



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

DETERMINACIÓN DEL ANCHO Y SEPARACIÓN MEDIA DE FISURAS EN ELEMENTOS PARCIALMENTE PRESENTADOS SOMETIDOS A CORTANTE.

Trabajo realizado por:

JUBERTT, CCORA MONTES

Dirigido por:

Jesús M. Bairán, Antonio Marí

Máster en:

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, enero de 2017

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

RESUMEN

El Hormigón Parcialmente Pretensado es una técnica que permite reducir costes respecto del hormigón totalmente pretensado, gracias a la optimización de las armaduras activas y pasivas necesarias para satisfacer simultáneamente los estados límite de servicio y de rotura con niveles de prestaciones similares.

Pese al avance en el estado del conocimiento, en el diseño de elementos de HPP, existen aún numerosos aspectos no resueltos. Los principales temas a resolver siguen siendo el de control de la fisuración a flexión y cortante. El presente trabajo buscará profundizar en el tema y encontrar patrones de fisuración diagonal de elementos de HPP sometidos a cargas de servicio.

En concreto este estudio se centra en analizar los parámetros básicos que condicionan los mapas de fisuración diagonal (separación entre fisuras, anchos y ángulos de fisura). Esto se llevará a cabo analizando una campaña experimental realizada en el Laboratorio Técnico de Estructuras Lluís Agulló (LTE), englobada en el proyecto: PROPOSE – Proyecto basado en prestaciones de estructuras de hormigón parcialmente pretensadas. Propuesta de nueva metodología, verificación experimental y criterios de proyecto.

Los parámetros en los que se centra el estudio son: el nivel de pretensado de la viga, el espesor del alma, la cuantía de armadura transversal, el espesor de recubrimiento en el alma, la cuantía de acero longitudinal en el alma, la cuantía de acero longitudinal en la zona de tracción y el trazado del pretensado. Se evaluará la influencia de estos parámetros en la determinación de la separación media entre fisuras (diagonal, horizontal y vertical), así como en su influencia sobre el ángulo medio de las fisuras y el ancho de las mismas.

Los resultados experimentales del patrón de fisuración se analizan con fotogrametría, usando un programa de Digital Image Correlation (DIC) creado por el estudiante de doctorado L. Sánchez. Este programa nos permite analizar las fotografías realizadas durante el ensayo y ver el desarrollo de las fisuras y comparar los diferentes patrones de fisuración.

Se han comparado las diferentes formulaciones existentes que buscan explicar los patrones de fisuración con los resultados experimentales.

PALABRAS CLAVES: Hormigón parcialmente pretensado, fisuración a cortante, fisuración diagonal, patrón de fisuras, fotogrametría.

ABSTRACT

Partially Prestressed Concrete (PPC) is a technique that allows reducing the cost of structures thanks to the optimization of the mild and active reinforcements obtained by satisfying the ULS and SLS with similar levels of performance.

Despite the advances in the state of the art, in the design of PPC elements there are many unresolved aspects. The main issues to be solved remain the control of cracking due to bending moment and shear. The present work will seek to deepen the subject and find diagonal cracking patterns of PPC elements subjected to service loads.

This study focuses on analyzing the basic parameters that take control of diagonal cracking (separation between cracks, crack widths and crack angles). This will be carried out by analyzing an experimental campaign carried out in the Laboratorio Técnico de Estructuras Lluís Agulló (LTE), included in the project: "PROPPOSE – Performance-based design of partially prestressed concrete structures. Proposal of a new methodology, experimental verification and design criteria".

The parameters in which the study is centered are: the prestressing level of the beam, the thickness of the web, the amount of transverse reinforcement, the thickness of concrete cover of the web, the amount of longitudinal steel in the web, the amount of longitudinal steel in the tensile zone and the lay out of the tendon. The influence of these parameters in the determination of the average separation between cracks (diagonal, horizontal and vertical), as well as their influence on the average crack angle and the width of the cracks will be evaluated.

The experimental results of the cracking pattern are analyzed with photogrammetry using a Digital Image Correlation (DIC) program created by the PhD. student L. Sánchez. This program allows us to analyze the pictures made during the test and see the development of the cracks and compare the different cracking patterns.

We have compared the different existing formulations that seek to explain cracking patterns with experimental results.

KEYWORDS: Partially prestressed concrete, shearing cracking, diagonal cracking, cracking pattern, photogrammetry.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Antonio Marí y Jesús M. Bairán, por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos, su generosidad y guiarme a llevar acabo el trabajo final de máster, por la disponibilidad de su tiempo y conocimientos para poder culminar esta etapa.

Agradecer a Ulric Celada por haberme brindado su apoyo en todo momento, a Noemí Duarte por su apoyo en cada etapa de este trabajo y a Luis Sánchez, por el apoyo que me brindo, que sin la ayuda de ellos no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

Agradecer a mi familia, en especial a mi madre, que me apoya a pesar de la distancia.

Finalmente agradecer al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo de Perú (PRONABEC) por haberme otorgado la beca para realizar mis estudios de máster.

ÍNDICE

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE GRAFICOS.	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1) MOTIVACIÓN.....	1
1.2) OBJETIVOS.	2
1.3) METODOLOGÍA.....	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1) HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL	3
2.1.1) ANTECEDENTES	3
2.1.2) ESTADO DE CONOCIMIENTO ACTUAL	5
2.1.3) DEFINICIÓN DEL PRETENSADO PARCIAL	5
2.1.4) VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL.....	10
2.1.5) CRITERIOS DE DISEÑO DEL PRETENSADO PARCIAL.....	10
2.2) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN.	16
2.2.1) Fisuración frente esfuerzos combinados.....	16
2.2.2) Anchos máximos de fisura según Euro código	17
2.3) FORMULACIONES DE CÁLCULO DE ANCHO MEDIO DE FISURAS.....	18
2.3.1) Collins and Mitchell (1991).	19
2.3.2) Yoon (1996).	20
2.3.3) CEB-FIB Model Code (1978).	20
2.3.4) EC2 EN-1992-1.	21
2.3.5) Modelo propuesto por De Silva (2008).	23
2.4) CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL ESTRIBO	26
2.5) CÁLCULO DE ÁNGULO DE FISURAS.	27
2.5.1) AASHTO-LRFD.	27
2.6) ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES.....	28
2.6.1) Procesamiento digital de imagen.	28
2.6.2) Filtrado espacial.	30
2.6.3) Detección de bordes y contornos.....	30
CAPÍTULO 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	31
3.1) INTRODUCCIÓN.....	31
3.2) OBJETIVOS.	31
3.3) DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA VIGA.....	32
3.4) INSTRUMENTACIÓN.....	37
3.5) METODOLOGIA DE ENSAYO.....	38
3.6) CARGA DEFORMACIÓN DE LAS VIGAS.	40
3.7) RESISTENCIA A CORTANTE	41

3.8)	RESULTADOS DE DEFORMACIÓN EN ESTRIBOS	42
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PATRÓN DE FISURAS POR CORTANTE.....		44
4.1)	INTRODUCCIÓN.....	44
4.2)	OBJETIVOS.	44
4.3)	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.....	45
4.4)	PATRÓN Y DISTRIBUCIÓN DE FISURAS.	45
4.5)	EFFECTO DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO EN LA SEPARACION ENTRE FISURAS Y ANGULO.	53
4.5.1)	<i>Recubrimiento de hormigón y ancho del alma.</i>	<i>53</i>
4.5.2)	<i>Grado de pretensado.....</i>	<i>56</i>
4.5.3)	<i>Efectos del espaciamiento de los estribos.</i>	<i>59</i>
4.5.4)	<i>Cuantía de refuerzo longitudinal.</i>	<i>61</i>
4.5.5)	<i>Efectos del espaciamiento del refuerzo secundario en alma.....</i>	<i>62</i>
4.5.6)	<i>Resumen del comportamiento</i>	<i>64</i>
4.6)	DISTRIBUCIÓN DE ANCHO DE FISURAS.....	64
4.7)	COMPARACIÓN DE VALORES TEORICOS Y EXPERIMENTALES.	67
4.7.1)	<i>Comparación de separaciones medias entre fisuras experimentales y calculados.</i>	<i>67</i>
4.7.2)	<i>Comparación ángulos medios experimentales y calculados.</i>	<i>73</i>
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		80
ANEXO		82

ÍNDICE DE GRAFICOS.

Figura 2-1. Equilibrio Interno en una sección pretensada fisurada.	13
Figura 2-2. Barrido del Plano de tensiones alrededor de un pivote.	14
Figura 2-3. Dominio no lineal de solución factible.	15
Figura 2-4. Distribución compleja de fisuras por cortante.	24
Figura 2-5. Idealización de la distribución de fisuras por cortante.	25
Figura 2-6. Parámetros que influyen en la separación de fisuras por cortante.	26
Figura 2-7. Distribución de esfuerzos en el hormigón.	27
Figura 2-8. Transformación de una imagen continua de escala de grises $F(x,y)$ a una imagen digital discreta $I(u,v)$. [19]	29
Figura 2-9. Ejemplo de una imagen y la primera derivada en una dimensión: imagen original (a), perfil horizontal de intensidad $f(x)$ a lo largo del centro de la imagen (b), y primera derivada $f'(x)$ (c). [19]	30
Figura 3-1. Disposición de la Viga Isostática.	32
Figura 3-2. Secciones de transversales de vigas.	33
Figura 3-3. Secciones de transversales de vigas.	34
Figura 3-4. Disposición de galgas en estribos ($s=150\text{mm}$) y refuerzo longitudinal (a) trazado de pretensado inclinado (b) trazo de pretensado recto.	38
Figura 3-5. Disposición de galgas en estribos ($s=250\text{mm}$) y refuerzo longitudinal (a) tramo con pretensado inclinado (b) tramo con pretensado recto.	38
Figura 3-6. Secuencia de carga vs tiempo (Q vs T).	39
Figura 3-7. Carga-desplazamiento de vigas I121R, I123R e I124R	40
Figura 3-8. Carga-desplazamiento de vigas I121I, I123I e I124I	40
Figura 3-9. Carga-desplazamiento viga I181I, I182I, I183I e I184I	41
Figura 3-10. Comparación de la resistencia a cortante de las piezas.	41
Figura 3-11. Carga vs Tiempo.	42
Figura 3-12. Distribución de estribos en la viga I121I.	42
Figura 3-13. Esfuerzo en los estribos.	43
Figura 4-1. Parámetros obtenidos de las imágenes procesadas.	45
Figura 4-2. Carga vs tiempo puntos de análisis.	46
Figura 4-3. Fotografía viga I123I en el ciclo 1.	48
Figura 4-4. Fotografía viga I123I en el ciclo 4.	48
Figura 4-5. Patrón de fisuras de viga I123I, (a) ciclo 1y (b) ciclo 4	49
Figura 4-6. Patrón de fisuras en las Vigas.	53
Figura 4-7. Separaciones $S_{m\vartheta}$, S_{my} y S_{mx} , de acuerdo a recubrimientos en el alma.	54
Figura 4-8. Ángulos medios de acuerdo a recubrimientos en el alma.	55
Figura 4-9. Separaciones de $S_{m\vartheta}$, S_{my} y S_{mx} , de acuerdo al alma de las vigas.	56
Figura 4-10. Ángulos medios de acuerdo al espesor de las almas	56
Figura 4-11. Separaciones $S_{m\vartheta}$, S_{mx} y S_{my} en función al esfuerzo de compresión del pretensado (σ_{cgp}). ...	57
Figura 4-12. Ángulos medios de según esfuerzo de compresión de pretensado (σ_{cgp}).	58
Figura 4-13. Separaciones, $S_{m\vartheta}$, S_{mx} , S_{my} organizados de acuerdo a la disposición del pretensado.	59
Figura 4-14. Ángulos medios organizados de acuerdo a la disposición del pretensado.	59
Figura 4-15. Separaciones organizadas de acuerdo a la separación de estribos.	60
Figura 4-16. Ángulos de acuerdo al espaciamiento de los estribos.	61
Figura 4-17. Separaciones vs cuantía de refuerzo longitudinal.	62
Figura 4-18. Ángulos vs cuantía de refuerzo longitudinal.	62
Figura 4-19. Separaciones vs cuantía de refuerzo en el alma	63

<i>Figura 4-20. Variación de ancho medio de fisura vs nivel de carga.</i>	65
<i>Figura 4-21. Anchos medios de acuerdo al nivel de pretensado.</i>	66
<i>Figura 4-22. Ancho medio de acuerdo a la cuantía de refuerzo longitudinal.</i>	66
<i>Figura 4-23. Comparación de Separaciones diagonal ($S_{m\theta}$) de fisuras experimentales y calculadas.</i>	68
<i>Figura 4-24. Comparación de separaciones horizontal (S_{mx}) de fisuras experimentales y calculadas.</i>	69
<i>Figura 4-25. Comparación de separaciones verticales (S_{my}) de fisuras experimentales y calculadas.</i>	70
<i>Figura 4-26. Comparación de separación $S_{m\theta}$, calculadas vs experimentales.</i>	70
<i>Figura 4-27 Comparación de separación S_{mx}, calculadas vs experimentales.</i>	71
<i>Figura 4-28 Comparación de separación S_{my}, calculadas vs experimentales.</i>	71
<i>Figura 4-29. Correlación de ángulos calculados e experimentales.</i>	75
<i>Figura 5-1. Patrón de Fisuras Viga I121I-Ciclo 3.</i>	83
<i>Figura 5-2. Patrón de Fisuras Viga I123I-Ciclo 3.</i>	85
<i>Figura 5-3. Patrón de Fisuras Viga I124I-Ciclo 3.</i>	86
<i>Figura 5-4. Patrón de Fisuras Viga I121R-Ciclo 3.</i>	88
<i>Figura 5-5. Patrón de Fisuras Viga I123R-Ciclo 3.</i>	89
<i>Figura 5-6. Patrón de Fisuras Viga I124R-Ciclo 3.</i>	91
<i>Figura 5-7. Patrón de Fisuras Viga I181I-Ciclo 3.</i>	92
<i>Figura 5-8. Patrón de Fisuras Viga I182I-Ciclo 3.</i>	94
<i>Figura 5-9. Patrón de Fisuras Viga I183I-Ciclo 3.</i>	95
<i>Figura 5-10. Patrón de Fisuras Viga I184I-Ciclo 3.</i>	97
<i>Figura 5-11. Trabajos de instrumentación de armaduras.</i>	97
<i>Figura 5-12. Hormigonado de vigas.</i>	97

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2-1. Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras	7
Tabla 2-2. Clasificación de acuerdo a la exposición ambiental	8
Tabla 2-3. Valores de anchos máximos de ancho de fisura $w_{max}(mm)$	18
Tabla 2-4. Diámetro (\varnothing s) máximo de barra para el control de fisura.....	18
Tabla 2-5. Espaciamiento máximo de barras para el control de fisura.....	18
Tabla 2-6. Relación entre la resistencia de unión, entre los tendones y el acero de refuerzo	22
Tabla 3-1. Distribución de armadura en vigas “I”	35
Tabla 3-2. Características del hormigón y tensión de pretensado.....	36
Tabla 3-3. Relación de carga para cada uno de las vigas.....	39
Tabla 4-1. Separación diagonal media $Sm\theta$	46
Tabla 4-2. Separaciones Horizontales medias Smx	47
Tabla 4-3. Separaciones verticales medias Smy	47
Tabla 4-4. Separación diagonal entre fisuras $Sm\theta$ para Q_{pp} en ciclo 3.....	49
Tabla 4-5. Separación horizontal entre fisuras Smx para Q_{pp} en ciclo 3.....	50
Tabla 4-6. Separación vertical entre fisuras Smy para Q_{pp} ciclo 3.	50
Tabla 4-7. Ángulos medios para el ciclo 3.	50
Tabla 4-8. Vigas agrupadas en función al recubrimiento.....	54
Tabla 4-9. Datos experimentales agrupada de acuerdo al espesor de alma.	55
Tabla 4-10. Resumen de datos experimentales según el esfuerzo de compresión (σ_{cgp}).	57
Tabla 4-11. Resumen de datos experimentales de acuerdo a la disposición del pretensado.	58
Tabla 4-12. Valores agrupados de acuerdo espaciamento de los estribos.	60
Tabla 4-13. Valores agrupados de acuerdo a la cuantía de refuerzo longitudinal.	61
Tabla 4-14. Valores agrupados de acuerdo a la cuantía de refuerzo en el alma.	63
Tabla 4-15. Valores agrupados de acuerdo espaciamento de los estribos.	63
Tabla 4-16. Resumen de anchos medios (mm) para los puntos de análisis.	65
Tabla 4-17. Resumen de Separaciones diagonal de fisuras ($Sm\theta$) experimentales y calculadas (mm).	67
Tabla 4-18. Resumen de separaciones horizontales de fisuras (Smx) experimentales y calculadas (mm).....	68
Tabla 4-19. Resumen de separaciones verticales de fisuras (Smy) experimentales y calculadas.	69
Tabla 4-20. Resumen de separaciones experimentales y teóricas para la formulación. [13].	72
Tabla 4-21. Ratio entre separaciones experimentales y teóricos para la formulación. [13].	73
Tabla 4-22. Correlación de ajuste de ángulos medios de fisura.	74
Tabla 4-23. Cálculo de ángulo propuesto De Silva.	74

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1) MOTIVACIÓN

El estudio del comportamiento del hormigón parcialmente pretensado, en los últimos años viene tomando importancia, existe la necesidad de construcción de obras civiles como puentes, empleando hormigón pretensado, pero al emplear el hormigón parcialmente pretensado se puede reducir los costos en la construcción, por ello la necesidad de conocer los métodos de diseño simplificado y además conocer el comportamiento de este tipo de elementos estructurales. Por ello se considera la filosofía de diseño basado en prestaciones, en este tipo de filosofía se hace un hincapié en el comportamiento final de la estructura y la relación con los requerimientos reales de los proyectos.

Las estructuras de hormigón parcialmente pretensado permiten la existencia de fisuración en servicio siempre que el ancho de fisura de las mismas se encuentre controlado según criterios normativos.

Las normativas existentes proporcionan formulaciones y criterios con los que controlar el ancho de fisura en piezas sometidas a esfuerzos de flexión. Sin embargo, la fisuración diagonal generada por la presencia de esfuerzos combinados de flexión y cortante es un tema no resuelto, existiendo poco consenso entre normativas y autores en el cálculo de los anchos de fisura

1.2) OBJETIVOS.

El objetivo de este trabajo final de máster es estudiar y analizar el patrón de fisuras a cortante en vigas isostáticas parcialmente pretensadas.

En concreto el estudio se centra en analizar la influencia de los parámetros básicos que condicionan los mapas de fisuración diagonal y el cálculo de ancho de fisura a partir de los datos experimentales obtenidos durante la primera campaña del proyecto PROPOSE – PROYECTO BASADO EN PRESTACIONES DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN PARCIALMENTE PRETENSADAS. PROPUESTA DE NUEVA METODOLOGÍA, VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL Y CRITERIOS DE PROYECTO.

Los parámetros en los que se centra el estudio son: el nivel de pretensado de la pieza, el espesor del alma, el espesor de recubrimiento en el alma, la cuantía de refuerzo longitudinal en el alma, el espaciamiento del refuerzo transversal (estribos), los refuerzos adicionales en el alma y la trazado del pretensado. Se evaluará la influencia de estos parámetros en la determinación de la separación media entre fisuras (diagonal, horizontal y vertical), así como en su influencia sobre el ángulo medio de las fisuras y en anchos medios.

El objetivo también se centra en comparar los resultados experimentales de separación de fisuras, ángulos de inclinación, tensión en los cercos con los valores teóricos propuestos por diversos autores.

1.3) METODOLOGÍA.

Se realiza una recopilación y estudio previo del estado de arte del pretensado parcial, conocimiento actual de la fisuración a cortante de elementos de hormigón armado y parcialmente pretensados y formulaciones analíticas para determinar anchos medios de fisuras y separación entre fisuras.

También se recopila información de la campaña experimental, métodos de ensayo, instrumentaciones utilizadas, imágenes digitales del patrón de fisuras.

Se realiza el procesamiento de imágenes, utilizando métodos fotogramétricos implementados en un programa en MATLAB por el estudiante de doctorado L: Sánchez. Utilizando este mismo programa se obtienen resultados del patrón de fisuras como separación media entre fisuras, ángulos medios y anchos medios.

Por último, se realiza la comparación de los resultados experimentales con los resultados analíticos de las formulaciones estudiadas.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1) HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL

2.1.1) ANTECEDENTES

En los años de 1930, Eugène Freyssinet establece con toda generalidad y propiedad, lo que en modo preciso puede definirse como la Técnica del Hormigón Pretensado, se consideró que la principal ventaja del pretensado consiste en equilibrar la carga permanente mediante la reacción que origina la curvatura de los tendones en cada punto, reacciones que, junto con las creadas por los anclajes terminales, mantenía en compresión el hormigón incluso bajo la acción de las sobrecargas, alejando toda posibilidad de fisuración y transformándolo en material continuo, homogéneo e isótropo [1].

La idea del pretensado parcial aparece más tarde, en el año 1939, en un extenso artículo publicado en alemán, el austriaco H. Von Emperger establece la tesis de que la descomposición de la armadura en dos fracciones, una activa que se pretensa y está formada por aceros de alta resistencia, y otra pasiva que se dispone sin tensar, puede

ser beneficiosa ya que, manteniéndose sin sensible reducción la carga final de rotura conjunta, se consigue una notable disminución en la carga de fisuración, reducción que él consideraba como beneficiosa en muchas ocasiones ya que proporcionaba un apreciable incremento en la flexibilidad final de la pieza. Mediante esta disposición, la armadura pasiva que así constituida por unas barras de acero ordinario, más una armadura adicional formada por alambres de alta resistencia de la misma calidad que los alambres de la armadura activa. Salvo detalles de menor importancia, la propuesta de Emperger equivale a reducir la tensión inicial de la armadura activa a unos niveles inferiores para renunciar, deliberadamente, a una compresión de todo el hormigón bajo la acción de las máximas sobrecargas de servicio.

Un año después P. W. Abeles defendía la tesis de Emperger, austriaco, pero residenciado en el Reino Unido, publica en inglés un primer artículo en el que defendía la tesis mantenida por su maestro con una solución económica a muchos problemas de las aplicaciones prácticas. Como ingeniero de los ferrocarriles británicos, Abeles tiene la oportunidad, no solo de diseñar apropiados pretensados parciales para resolver el problema de las traviesas, sino también realizar ensayos a escala natural sobre vigas prefabricadas empleadas en la construcción de puentes sobre líneas férrea que necesitaban ampliarse por motivos del tráfico, reforzarse por haber quedado dañados, o rehabilitarse para ampliar el gálibo necesario para el nuevo tendido eléctrico. Los ensayos, algunos llevados hasta la rotura, mostraron la idoneidad del procedimiento siempre que los alambres, no pretensados, ocupasen la posición apropiada y se mantuviese una ponderada compresión sobre el hormigón bajo unos adecuados niveles mínimos de sobrecarga.

En 1951 el Instituto Británico de Ingenieros Estructurales, publica un primer informe sobre la técnica del hormigón pretensado en el que los autores, en su afán por no coartar innecesariamente el desarrollo de las diferentes tendencias, adoptan la actitud ecléctica de establecer tres tipos de soluciones legítimas:

- I. Estructuras en las cuales debe ser eliminada toda posibilidad de fisuración bajo las cargas previstas como de servicio.
- II. Estructuras en las cuales la posible fisuración queda restringida a los casos de infrecuentes combinaciones de cargas sumamente desfavorables.
- III. Estructuras en las que se permite una visible, pero capilar, fisuración bajo sobre cargas de servicio relativamente frecuentes.

A medida avanza el conocimiento del uso del Hormigón pretensado, se realizan publicaciones al respecto en 1951 el instituto Británico de Ingenieros Estructurales establece tres tipos de soluciones legítimas.

- a) Estructuras en las cuales debe ser eliminada toda posibilidad de fisuración bajo las cargas previstas como de servicio.
- b) Estructuras en las cuales la posible fisuración queda restringida a los casos de infrecuentes combinaciones de cargas sumamente desfavorables.
- c) Estructuras en las que se permite una visible, pero capilar, fisuración bajo sobre cargas de servicio relativamente frecuentes.

La importancia de esta referencia radica en que, por primera vez, se define de un modo genérico los planteamientos establecidos por Abeles. De un modo explícito, se legitiman los pretensados parciales, aunque, se limita su aplicación a determinadas funciones estructurales.

Un importante desarrollo de la técnica del pretensado se produjo en Francia, que exigió fijar un cierto número de reglas de obligado cumplimiento. Este fue el objetivo de las Instrucciones provisionales relativas al empleo del hormigón pretensado de 1953 presenta las siguientes particularidades.

- a) No limita la tensión inicial en las armaduras de pretensado, manteniendo la tradición de Freyssinet.
- b) Prohibía cualquier tensión de tracción en las piezas estableciendo que el hormigón pretensado debía resistir en todos los puntos, en perfecto estado de integridad, sin roturas ni fisuras.

Al final del decenio, en el año de 1959, aparece la primera Norma Británica para la utilización del pretensado, una norma que, si bien legitima el uso de los pretensados parciales en la edificación, las Especificaciones del Ministerio del Transporte lo prohíben.

Curiosamente, cuando la técnica de los pretensados parciales se extiende por Norteamérica, Centroeuropa y Japón, es cuando la polémica en torno a sus ventajas se reaviva.

2.1.2) ESTADO DE CONOCIMIENTO ACTUAL.

El comportamiento del hormigón pretensado parcial fue muy estudiado al final del S.XX, destacando las aportaciones de A.E. Naaman, A.S.G. Bruggelin, Hugo Bachmann, entre otros, quienes han contribuido a establecer criterios de diseño para el pretensado parcial, algunos de estos criterios condicionantes para el desarrollo de un proyecto están la limitación de la fisuración, limitación de las deformaciones y seguridad frente a los fenómenos de fatiga.

2.1.3) DEFINICIÓN DEL PRETENSADO PARCIAL.

Con la finalidad definir el pretensado parcial es necesario conocer los conceptos de pretensado.

"Pretensado parcial" es un término controversial, ya que no se pretende denotar que una viga está pretensada parcialmente, como podría parecer ser el caso. Más bien, pretensado parcial describe vigas pretensadas en el cual la fisuración es limitado, se permite mediante el uso de refuerzo pre esforzado suave adicional para controlar la extensión y el ancho de las fisuras y asumir parte del momento ultimo a flexión. Dos ventajas importantes de pretensado parcial son el uso eficiente de todos los materiales constituyentes y el control del acortamiento excesivo debido a la fluencia a largo plazo de hormigón bajo compresión. [2]

Por otra parte [1], menciona la definición de la ecuación 2-1, el cual resulta de dividir el llamado momento de descompresión después de las pérdidas, por el máximo momento producido por las cargas de servicio incluidas las cargas permanentes y peso propio. Una pieza se considera sometida a pretensado total, cuando en todas las secciones la citada relación supera la unidad. Una pieza está sometida a un pretensado parcial cuando, en la sección crítica el coeficiente α_p es menor que uno.

$$\alpha_p = \frac{M_o}{M_s} \quad 2-1$$

Según [3], el hormigón pretensado parcial o en clase III es una situación intermedia entre el caso de pretensado total (dimensionamiento en clase I) y el hormigón armado (sin fuerza alguna de pretensado) no está claramente definido cuál es la situación más condicionante para el dimensionamiento de armaduras activas y pasivas. El límite de fisuración controlada o el estado límite último de agotamiento por flexo compresión.

Las estructuras pretensadas dimensionadas en clase III, esto es, permitiendo que, para la hipótesis de carga más desfavorable la pieza se fisure, no superando un ancho de fisura límites y obligando a que para las cargas permanentes la pieza esté siempre comprimida.

Se puede definir que el hormigón parcial pretensado es una situación intermedia entre el hormigón armado y el hormigón pretensado, en el que se permite la fisuración(descompresión) controlado que no supere límites establecidos, para las condiciones de cargas más desfavorables, para los criterios se define que se encuentre en la clase III.

Es necesario conocer cuáles son los criterios de clasificación, esto se detalla a continuación de acuerdo a las normativas. La Tabla 2-1, se muestra la clasificación de exposición a la corrosión de las armaduras de acuerdo al EHE-08. [4]

También se presenta la clasificación de acuerdo a las condiciones de exposición al ambiente según el Euro código, se detallan en la Tabla 2-2. [5]

Tabla 2-1. Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
No agresiva		I	Ninguno	<ul style="list-style-type: none"> – Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. – Elementos de hormigón en masa. 	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos estructurales de edificios, incluido los forjados, que estén protegidos de la intemperie.
Normal	Humedad alta	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> – Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones. – Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. – Elementos enterrados o sumergidos. 	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos estructurales en sótanos no ventilados. – Cimentaciones. – Estribos, pilas y tableros de puentes en zonas, sin impermeabilizar con precipitación media anual superior a 600 mm. – Tableros de puentes impermeabilizados, en zonas con sales de deshielo y precipitación media anual superior a 600 mm. – Elementos de hormigón, que se encuentren a la intemperie o en las cubiertas de edificios en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. – Forjados en cámara sanitaria, o en interiores en cocinas y baños, o en cubierta no protegida.
	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	<ul style="list-style-type: none"> – Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos estructurales en construcciones exteriores protegidas de la lluvia. – Tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. – Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km). 	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa. – Puentes en las proximidades de la costa. – Zonas aéreas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral. – Instalaciones portuarias.
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar. 	<ul style="list-style-type: none"> – Zonas sumergidas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral. – Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.

	En zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	Corrosión por cloruros	– Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas.	– Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral. – Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea.
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	Corrosión por cloruros	– Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. – Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	– Piscinas e interiores de los edificios que las albergan. – Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve. – Estaciones de tratamiento de agua.

Tabla 2-2. Clasificación de acuerdo a la exposición ambiental

Designación de Clase	Descripción del ambiente	Ejemplos donde la exposición de la clase puede ocurrir
1. No hay riesgo de corrosión		
X0	Hormigón si refuerzo o metal incrustado en todas las exposiciones excepto donde hay hielo o deshielo, abrasión o ataque químico. Hormigón con refuerzo o metal incrustado: muy seco	Hormigón dentro de edificios con humedades bajas.
2. Corrosión por carbonatación		
XC1	Seco o permanente húmedo.	Hormigón dentro de edificios con humedades bajas. Hormigón permanentemente sumergido en agua.
XC2	Húmedo, raramente seco.	Superficie en contacto con agua a largo plazo. Algunos cimientos.
XC3	Humedad moderada.	Hormigón dentro de edificios con humedades altas o moderadas. Hormigón exterior protegido de la lluvia.
XC4	Ciclos húmedos/seco.	Superficie en contacto con agua, no incluidas en XC2
3. Corrosión por cloruros		
XD1	Humedad moderada.	Superficie expuesta a cloruros.
XD2	Húmedo, raramente seco.	Piscinas. Hormigón expuesto a aguas industriales que contienen cloros.
XD3	Ciclos húmedos/seco.	Partes de puentes expuestas a pulverización de cloruros. Pavimentos.
4. Corrosión inducida por cloruros de origen marino.		

XS1	Expuesto a las sales aerotransportadas sin contacto directo con el agua de mar.	Estructuras cercanas o en la costa.
XS2	Permanentemente sumergidas en el mar.	Estructuras marinas.
XS3	Zona de mareas y salpicaduras.	Estructuras marinas.
5. Ataque de Hielo/Deshielo		
XF1	Saturación de agua moderada, sin sales fundentes.	Superficies verticales expuestas a lluvia y hielo.
XF2	Alta saturación del agua, con sales fundentes.	Superficies verticales de carreteras expuesta a lluvia, hielo y sales fundentes.
XF3	Alta saturación del agua, sin sales fundentes.	Superficies horizontales expuestas a lluvia y hielo.
XF4	Alta saturación del agua, con sales fundentes.	Superficies horizontales de carreteras expuestas a lluvia, hielo y sales fundentes. Zona de mareas con heladas.
6. Ataque químico		
XA1	Baja agresividad (EN 206-1 tabla 2)	Contacto con el terreno y agua subterránea.
XA2	Agresividad moderada (EN 206-1 tabla 2)	Contacto con el terreno y agua subterránea.
XA3	Alta agresividad (EN 206-1 tabla 2)	Contacto con el terreno y agua subterránea.

2.1.4) VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN PRETENSADO PARCIAL.

Se detalla y describe las características del hormigón pretensado y pretensado parcial.

Según [3] los inconvenientes del hormigón totalmente pretensado son.

1. El pretensado se dimensiona para contrarrestar la totalidad de la carga (aunque ésta se presenta raras veces), que pueda ser muy superior a la carga debida al estado permanente. Ello conduce a la necesidad de dimensionar fuertes cabezas de compresión (talones) para alojar el importante volumen de compresiones del pretensado en vacío. Por otra parte, suele producirse importantes contra flechas tanto instantáneas como diferidas.
2. Gran consumo de acero de pretensado incluso en zonas de la estructura donde no se precisan altos niveles de pretensado.
3. Nivel de seguridad a rotura innecesariamente alto.
4. La no existencia de armadura pasiva hace que la posible aparición de fisuras por causas imprevistas (y no excesivamente serias) no esté controlada, con lo que la abertura de fisuras pueda hacer peligrar la durabilidad de la obra por corrosión de acero activo.

El hormigón pretensado parcial da solución satisfactoria a los puntos antes mencionados, siendo estos

1. Conduce a una menor cuantía de pretensado frente a una mayor de armadura pasiva (a igualdad de dimensiones de la sección de hormigón) que, en la mayor parte de los casos supone un ahorro económico. Frente a las sobrecargas la estructura se fisura volviéndose a cerrar las fisuras una vez aquéllas han desaparecido. Si la sobre carga es una acción indirecta (por ejemplo, el gradiente térmico antes citados), al fisurarse la pieza baja su rigidez y por tanto los esfuerzos térmicos generados son reducidos. Pero, además la fisuración está controlada por la presencia de armadura pasiva suficiente.
2. No existe generalmente problemas de cabezas de compresión en vacío excesivamente grandes ni de contra flechas de pretensado excesivas.

Sin embargo, el pretensado parcial, al implicar una apertura de fisuras bajo la acción de sobrecargas, puede estar contraindicando en casos en que éstas se repitan un gran número de veces, pues puede generar el agotamiento por fatiga al ser considerablemente el incremento de tensión en la armadura activa.

2.1.5) CRITERIOS DE DISEÑO DEL PRETENSADO PARCIAL.

A continuación, se describen los criterios de diseño para elementos de hormigón parcialmente pretensados.

[1], detalla diversos criterios de diseño refiriéndose a diversos autores, a continuación, se detallan alguna de ellas.

a) H. Bachmann

H. Bachmann considera que el éxito para una buena solución estructural se logra cuando se satisfacen los siguientes requisitos y prioridades:

1. Profundo conocimiento de una concepción general.
2. Adecuada resolución de los detalles.
3. Alta calidad de ejecución.
4. Suficiente precisión en el cálculo.

Considera que el cálculo de pretensado parcial, no sólo puede, sino que debe ser más sencillo. La experiencia le mostró que unas prescripciones simples y precisas, conducen a una amplia aceptación por parte de los proyectistas y constructores, proponiendo los siguientes criterios de diseño que sirvan de orientación para estructuras parcialmente pretensadas:

- a. Suponer que las fuerzas de descompresión equivalen al pretensado P_e .
- b. De un modo similar, el momento de descompresión puede expresarse directamente en término de P_e .
- c. El análisis de las estructuras hiperestáticas bajo la acción de las cargas permanentes y de las sobrecargas de utilización, puede ser razonablemente basado en la hipótesis de prefisuración, ya que, en general, la fisuración sólo afecta de un modo insignificante la distribución de momentos.

Para el método de cálculo se tendría que tener en cuenta:

1. Momento de descompresión M_0 .
2. Grado de pretensado.
3. La elección, ya sea del grado de pretensado como el momento de descompresión.
4. Disposición adecuada de la armadura pasiva.
5. En función de la armadura activa, así será la cuantía de armadura pasiva.

b) A.E.Naaman

Para Naaman la condición, necesaria y suficiente, para que una pieza de hormigón pueda considerarse como parcialmente pretensada, es la de contener armaduras pretensadas y no pretensadas para resistir las cargas exteriores de la misma naturaleza. Esta definición ofrece las siguientes ventajas:

1. Separar las propiedades intrínsecas de la sección, de la magnitud de las cargas aplicadas y, en particular, de las que implican un estado de fisuración.
2. Permitir un inmediato tratamiento unificado de la resistencia nominal.
3. Como ocurre con las normas, esta definición permite una neta distinción entre estado final de agotamiento resistente y los estados de utilización o servicio cuando la fisuración esté definida.

El cálculo de una estructura implica la determinación de una serie de incógnitas que incluyen no solo las secciones de las armaduras sino también las mismas dimensiones de la sección transversal de la pieza que se considera. Como norma general, puede decirse que el cálculo de la armadura empieza cuando ya están decididas las

dimensiones transversales de la pieza. En el caso del hormigón pretensado, son tres incógnitas por desdoblamiento de la armadura en activa y pasiva y una tercera condición que se precisa para llegar a una única solución. Tenemos varios criterios para obtener la tercera condición y son los siguientes:

1. Limitar la tensión ficticia de tracción en la fibra más extendida de la pieza bajo la carga máxima de servicio.
2. Limita la máxima tensión de compresión al finalizar la maniobra de pretensado.
3. Limitar la tensión en el acero bajo la acción de cargas reiteradas.
4. Limitar la flecha.
5. Limitar la máxima abertura permisible de grietas.
6. Identificar el momento de descompresión con el debido a las cargas permanentes.
7. Equilibrar parte de la sobrecarga.
8. Aceptar a priori un cierto valor para uno de los diversos índices o niveles de pretensado.

En opinión de Naaman, lo preferible es adoptar unos criterios selectivos que también puedan aplicarse al hormigón armado, por ello propone establecer la tercera solución mediante apriorística valoración del índice denominado como Relación del Pretensado Parcial (PPR). Relación definida como el cociente entre el momento que teóricamente produciría la rotura de la pieza armada solo con armadura de pretensado por el momento que nominalmente producirá la rotura de la misma sección dotada de las dos armaduras.

Una vez definida las armaduras que satisfacen las condiciones impuestas por el cálculo en rotura, se hace necesario comprobar el estado tensional de la pieza en condiciones de servicio, aunque Naaman recomienda prescindir de las tensiones de tracción y comprobar únicamente las de compresión.

c) A.S.G. Bruggeling

Las tres razones por las cuales los pretensados parciales no están hoy universalmente aceptados:

- a. Muchos de los procedimientos de diseño para el análisis de las secciones parcialmente pretensada, se consideran como muy complicados y su cálculo en extremo laborioso.
- b. Muchas de las normas nacionales no propician el empleo de esta modalidad.
- c. La experiencia sobre estructuras construidas es escasa y la experimentación sobre piezas, insuficiente.

Con el intento de atajar las objeciones primera y tercera, la Universidad de Delft ha iniciado una serie de estudios y experimentos que concluyó que, partiendo de unos principios elementales, el cálculo de las tensiones en las armaduras bajo carga de servicio, puede desarrollarse como si se trata de una estructura de hormigón armado sometida a carga excéntrica.

d) CH. Menn

Desde el punto de vista de un proyectista como Menn, los tres principales condicionantes para determinar el desarrollo de un proyecto con arreglo a la técnica de los pretensados parciales:

1. Limitación de la fisuración.
2. Limitación de las deformaciones.
3. Seguridad frente a los fenómenos de fatiga.

Todo proyectista deberá comprobar el incremento de deformación que sufre la armadura al pasar del momento de descompresión al momento causado por las cargas permanentes, es lo suficiente pequeño para no originar fisuras inaceptables.

Un criterio de diseño frecuente, consiste en disponer la armadura activa en la proporción y trazado necesario para compensar, con su efecto ascensional, las cargas que permanentemente actúan sobre el conjunto. Al estar en unas condiciones tan favorables puesto que está sometido a una compresión centrada, este no experimente ninguna flecha, denominándolo pretensado ideal.

Para Menn, el principal inconveniente de los pretensados parciales es el de que cualquier pérdida imprevista de pretensado, conduce a unas tensiones adicionales en el acero y a unas deformaciones de la estructura notablemente superiores a las que tales pérdidas originarían en la misma pieza totalmente pretensada.

e) Diseño basado en diagramas no lineales de Magnel.

Por otra parte se tiene el método propuesto por [6], para secciones parcialmente pretensadas, en las que se determinan el grado de pretensado óptimo para una abertura de fisura dada considerando la no linealidad de la solución.

La metodología parte del análisis de secciones pretensadas fisuradas. Conociendo el valor del momento exterior (M), la cuantía de armadura pasiva a disponer (A y A') y dado un plano de deformaciones, es posible determinar el equilibrio las fuerzas y momentos el valor de la fuerza de pretensado que garantiza dicho equilibrio.

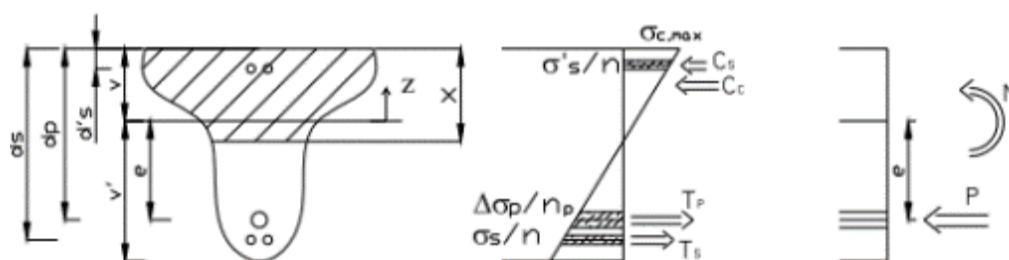


Figura 2-1. Equilibrio Interno en una sección pretensada fisurada.

$$\Sigma F = P = \int_{v-x}^v \sigma_c(z)b(z)dy + A'_s\sigma'_s + A_s\sigma_s - A_p\Delta\sigma_p \quad 2-2$$

$$\Sigma M = M_{tot} = M - Pe = \int_{v-x}^v z\sigma_c(z)b(z)dy + (v - d'_s)A'_s\sigma'_s + (d_s - v)A_s\sigma_s - eA_p\Delta\sigma_p \quad 2-3$$

La construcción del diagrama no lineal, Figura 2-1, se realiza variándola posición de la fibra neutra(x) y fijando la posición de criterios pivotes acordes a las diversas tensiones máximas y mínimas en las verificaciones y servicio.

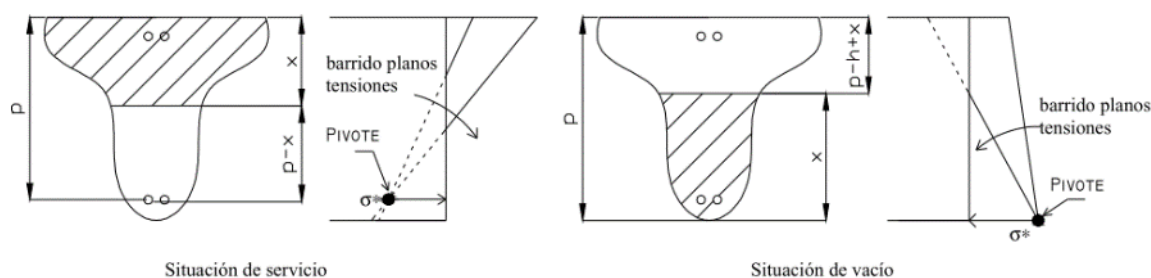


Figura 2-2. Barrido del Plano de tensiones alrededor de un pivote.

A diferencia del diagrama de Maganel lineal, la metodología de cálculo no lineal propuesta, proporciona la fuerza de neutralización (Pn) con la que posteriormente se determina la armadura Ap.

Adicionalmente a las 4 inecuaciones tradicionales de Magnel, el método se amplía con dos limitaciones adicionales obtenidas de un barrido seccional:

- i. Inecuación 5: en función del tipo de ambiente y la normativa considerada, se debe comprobar que, para la combinación cuasi permanente de servicio, la vaina del pretensado no se encuentra descomprimida. Esta limitación puede gobernar el diseño en función del % de carga permanente y % de sobrecarga. Se impone como pivote que la tensión en la fibra de la vaina sea cero.
- ii. Armadura necesaria en estado límite último; en estructuras HPP la cuantía de armadura activa necesaria por criterios de servicio puede resultar en rotura. En muchos casos, el déficit de capacidad resistente puede suplirse mediante armadura pasiva y en otros, es recomendable aumentar Ap. La curva asociada a la condición de momento último se incluye dentro del diagrama de Magnel no lineal mediante la siguiente metodología: se realiza un barrido para diversos valores de profundidad de cabeza de compresión y con la posición del pivote situada en la fibra más comprimida ($\epsilon_c=0.0035$). A partir de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas queda garantizado. Los valores (P, Pe) se incluyen en el diagrama una vez han sido multiplicados por el factor (σ_{p0}/f_{yd}) , es decir dividiendo la tensión de tesado en servicio por la tensión de rotura minorada.

El criterio de diseño consiste en fijar unos valores de Asmin, armadura pasiva mínima, con los que posteriormente determinar la Ap necesaria para que la abertura de fisura se mantenga dentro de los valores normativos admisibles. El valor de la abertura de fisura (w) depende no sólo de la separación de las mismas, también depende fuertemente de la contribución del hormigón entre fisuras (tensión stiffening), por ello una correcta cuantificación de ambos parámetros es necesaria para poder determinar con exactitud el valor de la tensión en la armadura pasiva justo en la fisura.

Umbral	Descripción	Posición pivote	Tensión pivote
1	Compresión en vacío	$p = h$	$\sigma^* = 0.6f_{cj}$
2	Tracción en vacío	$p = d'$	$\sigma^* = \frac{1}{n}\sigma'_{sd}$
3	Tracción en servicio	$p = d'$	$\sigma^* = \frac{1}{n}\sigma'_{sd}$
4	Compresión en servicio	$p = 0$	$\sigma^* = \frac{1}{n}\sigma'_{sd}$
5	Cuasi permanente	$p = vaina$	$\sigma^* = 0$
6	Momento ultimo	$p = h$	$\varepsilon_c = 0.0035$

El método se puede resumir mediante los siguientes pasos:

1. Elección de los valores límite de tracciones y compresiones, mediante la delimitación del ancho de fisura o el rango de tensiones permitida en estado límite de fatiga.
2. Suposición de la armadura pasiva, se puede tomar el área mínima requerida según la normativa.
3. Obtener el espacio de soluciones mediante la construcción del diagrama no lineal de Magnel con los parámetros establecidos en el punto anterior
4. Elección de la excentricidad según las disposiciones de durabilidad y disposición de armaduras. En el diagrama no lineal de Magnel se intersecta una recta que represente la excentricidad máxima.
5. Determinar el valor máximo P_{max} y mínimo P_{min} de la fuerza de pretensado mediante el diagrama no lineal de Magnel.
6. Obtener la fuerza pretensado P , descontando las pérdidas por pretensado. Inicialmente se puede suponer un porcentaje entre el 20 y 30%.
7. Finalmente calcular el área de la armadura activa A_p mediante las siguientes expresiones:

La metodología descrita, considera mesaría controlar la abertura de fisura y se mantenga dentro de los valores normativos admisibles.

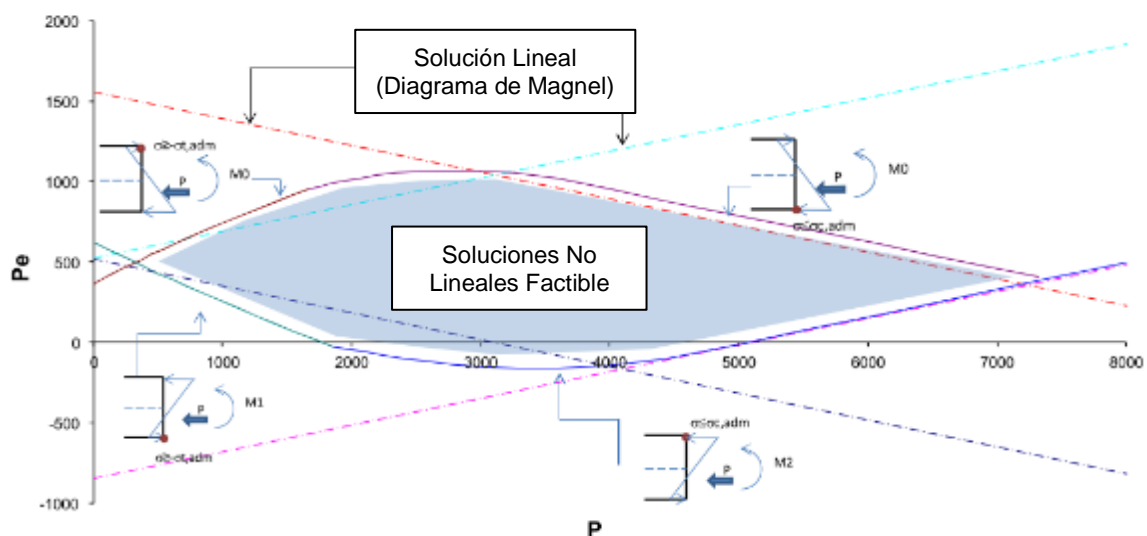


Figura 2-3. Dominio no lineal de solución factible.

2.2) FISURACIÓN DEL HORMIGÓN.

La fisuración en el hormigón se puede separar en dos grupos diferentes según el origen de las fisuras, estas pueden ser de origen no mecánico o/y mecánico.

En el primer grupo son consideradas las fisuras por retracción plástica, endurecimiento hidráulico, de origen químico, por adherencia.

En el segundo grupo están las fisuras que se generan en elementos estructurales cuando están en estado de servicio y están asociadas a las cargas a las cuales está sometida el elemento (flexión, tracción, cortante, torsión, adherencia, etc.) o por deformaciones impuestas (contracción, efectos térmicos). Los elementos estructurales habitualmente en estado de servicio se encuentran fisurados. Este trabajo se centra en el estudio de fisuración debido a las solicitaciones de carga por efecto de cortante en vigas parcialmente pretensadas, considerando además que en el criterio de diseño empleado como parámetro fundamenta el control de la fisuración.

2.2.1) Fisuración frente esfuerzos combinados

En la actualidad la gran mayoría de estructuras, sobretodo puentes, se diseñan según criterios de pretensado parcial ya que la no descompresión bajo ninguna situación de carga de servicio es infrecuente. Pese a que existen diversas filosofías de diseño en cuanto al grado de pretensado óptimo y la armadura pasiva necesaria asociada al mismo las incertidumbres asociadas al problema de fisuración por flexión y sobre todo por cortante siguen generando debate.

El modelo de fisuración distribuida es la metodología clásica para cuantificar el ancho de fisura analíticamente, ya sea ésta producida por flexión, por cortante o bien por una combinación de ambos. La abertura de fisura característica (w_k) se obtiene promediando los valores de separación media entre fisuras (S_m) y considerando la deformación de la armadura traccionada (ε_m), cuya deformación considera generalmente la contribución del hormigón entre fisuras. [7]

$$w_k = k S_m \varepsilon_{sm} \quad 2-4$$

La fisuración diagonal (a cortante) ha sido mucho menos estudiada, principalmente en el ámbito del HPP; en la actualidad pocas normativas ofrecen indicaciones sobre ella. [7], esto se puede corroborar como se mencionó en la sección anterior.

Existen investigaciones que estudiaron el comportamiento del patrón de fisuras a flexión y a cortantes en el cual desarrollan y analizan los diferentes factores que influyen en la formación de estas, se realizaron tanto en hormigón armado (HA) y hormigón parcialmente pretensados (HPP).

Para elementos en el cual la tensión dominante es la cortante o tensión diagonal en [8], indica se genera una fisura crítica y en el momento de la falla descaran todas las fisuras sobre esta. Los estudios realizados en [9] muestra las cargas cíclicas influyen en el incremento del ancho de fisura a cortante.

Un parámetro que influye al ancho de la fisura es el cuantía de refuerzo en el alma [10], elementos menor cuantía en el alma presentan anchos de fisura mayores.

En [11] la variación de recubrimiento de 5 a 50mm no presenta un efecto significativo en el ancho de las fisuras diagonales, sin embargo un incremento a 75 mm causó un incremento significativo en el ancho de las fisuras. Por otro lado de acuerdo a [12] el incremento del recubrimiento en el alma muestra mayor separación entre fisuras.

De acuerdo a De Silva [13], el pretensado influye en el ancho de fisura, elementos con pretensado muestran menores anchos de fisura en comparación con elementos de hormigón armado y además influye en el ángulo medio del patrón de fisuras, el cual disminuye en comparación con las vigas sin pretensado.

Otro factor importante que afecta el ancho de las fisuras como indica [14] es la deformación en los refuerzos de los estribos (ε_w), esto se aplica para elementos de hormigón armado y parcialmente pretensado. Además de acuerdo a [12] el ancho de fisura se incrementa proporcionalmente a la deformación en los estribos (ε_w) siendo esta un factor importante.

La separación entre los estribos también influyen en el ancho de fisuras como indica [15], emplear separaciones más pequeñas entre estribos reduce significativamente el ancho de fisuras, es más pronunciado la variación en elementos de hormigón armado a comparación que en los elementos de hormigón parcialmente pretensados. Por otro lado de acuerdo a [12], a menor separación entre estribos se presentan menores separaciones entre fisuras.

El ancho de fisura se incrementa proporcionalmente a la separación entre fisuras de acuerdo a [12] el cual se considera como un factor importante.

De acuerdo a [16], analiza los modelos existentes para el espaciamiento entre fisuras a cortante, con concluye que los modelos emplean todos los factores necesarios pero no apropiadamente de igual manera para anchos de fisuras.

2.2.2) Anchos máximos de fisura según Euro código

Esta norma presenta las siguientes consideraciones sobre el control de fisuras.

La fisuración se limitará en una medida que no perjudique el buen funcionamiento o la durabilidad de la estructura o que su apariencia sea inaceptable.

La fisuración es normal en las estructuras de hormigón armado sujetas a flexión, cortante, torsión o tensión resultante de carga directa o retención o deformaciones impuesta.

Se puede permitir que las grietas se formen sin intentar controlar su ancho, siempre que no perjudiquen el funcionamiento de la estructura.

Presentan limitaciones de anchos de fisuras w_{max} cuando se calculan los anchos de fisura w_k teniendo en cuenta la naturaleza y las funciones de la estructura como se detalla en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Valores de anchos máximos de ancho de fisura $w_{max}(mm)$

Clase de exposición	Armaduras pasivas o activas no adherentes Combinaciones de carga cuasi permanente.	Armaduras activas adherentes Combinación de carga frecuente.
X0, XC1	0.4 ¹	0.2
XC2, XC3, XC4	0.3	0.2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Descompresión
(1) Si no hay consideraciones de apariencia, este límite puede aumentarse.		
(2) comprobación también la descompresión en combinaciones cuasi permanentes.		

Para realizar el cálculo del ancho detalla dos alternativas, uno simplificado que consiste en limitar el diámetro de la barra o el espaciamiento, como se detalla en la Tabla 2-4 y Tabla 2-5.

Tabla 2-4. Diámetro (\varnothing s) máximo de barra para el control de fisura.

Tensión Acero (Mpa)	Diámetro de la barra (mm)		
	Wk=0.4mm	Wk=0.3mm	Wk=0.2mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	-

Tabla 2-5. Espaciamiento máximo de barras para el control de fisura.

Tensión Acero (Mpa)	Separación máxima (mm)		
	Wk=0.4mm	Wk=0.3mm	Wk=0.2mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Realiza una consideración cuando se trata del hormigón post-tensado, donde el control de la fisura es proporcionado principalmente por el refuerzo pasivo, las tablas anteriores se pueden utilizar con la tensión en este refuerzo calculadas con el efecto de las fuerzas de pretensado incluidas. [5]

2.3) FORMULACIONES DE CÁLCULO DE ANCHO MEDIO DE FISURAS

Diversos autores han planteado formulaciones para el cálculo del ancho de fisura ante esfuerzos cortantes. La gran mayoría de propuestas para el cálculo se basa en la ecuación 2-4 en la formulación basadas en deformaciones principales (ε_1) y deformaciones del estribo (ε_w). Cabe destacar la formulación propuesta por Vecchio y

Collins [17] para la separación media de fisuras, que se adopta como formulación básica por la gran mayoría de autores,

Algunas de ellas han sido incorporadas recientemente en diversas normativas. Se detalla a continuación las más representativas.

2.3.1) Collins and Mitchell (1991).

Collins propone una metodología para calcular el ancho de fisura en vigas de Hormigón armado.

$$w_k = S_{m\theta} \varepsilon_1 \quad 2-5$$

A continuación, se muestra las expresiones que se usan para determinar la separación diagonal de las fisuras.

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{S_{mx}} + \frac{\cos\theta}{S_{my}}} \quad 2-6$$

$$S_{mx} = 2 \left(c_{mx} + \frac{s_x}{10} \right) + 0.25k_1 \frac{d_{kx}}{\rho_{cx}} \quad 2-7$$

$$S_{my} = 2 \left(c_{my} + \frac{s_y}{10} \right) + 0.25k_1 \frac{d_{ky}}{\rho_{cy}} \quad 2-8$$

Donde:

w_k : ancho medio de la fisura (mm).

ε_1 : tensión principal.

$S_{m\theta}$: separación diagonal entre fisuras(mm).

S_{mx} : separación horizontal entre fisuras (mm)

S_{my} : separación vertical entre fisuras (mm).

c_{mx} : distancia del centro de gravedad a la parte superior de refuerzo horizontal.

s_x : distancia de centro a centro del refuerzo longitudinal en la zona del alma.

k_1 : coeficiente que depende de las características de enlace de la barra.

$k_1 = 0.4$ para barras corrugadas $k_1 = 0.8$ para barras lisas.

d_{kx} : diámetro del refuerzo longitudinal.

$\rho_{cx} = A_{sx}/A_{c,ef}$

$A_{c,ef}$: área efectiva del hormigón en tensión $A_{c,ef} = 2.5 * (h - de) * bw$.

A_{sx} : área de acero longitudinal.

c_{my} : distancia del centro de gravedad al refuerzo vertical más cercano.

s_y : separación de refuerzo vertical (separación de estribos).

d_{ky} : es el diámetro del refuerzo vertical (diámetro del estribo).

$\rho_{cy} = A_{sy}/b_w s_y$

A_{sy} : área de acero vertical (área de estribos).

2.3.2) Yoon (1996).

Yoon, propone la siguiente ecuación para calcular el ancho de fisura en vigas de hormigón armado. Las separaciones de las fisuras son calculadas de las distancias de los refuerzos en las dos direcciones ortogonales. La distancia diagonal se calcula de la ecuación 2-10.

$$w_k = S_{m\theta} \varepsilon_1 \quad 2-9$$

A continuación, se muestra la expresión para determinar la separación diagonal de las fisuras.

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{S_{mx}} + \frac{\cos\theta}{S_{my}}} \quad 2-10$$

Donde:

w_k : ancho medio de fisura (mm).

ε_1 : tensión principal de deformación.

$S_{m\theta}$: separación diagonal media entre fisuras (mm).

θ : Angulo de la fisura.

$S_{mx} = d$: canto útil en mm.

$S_{my} = s_y$: distancias entre cercos(estribos) en mm.

2.3.3) CEB-FIB Model Code (1978).

El Código modelo CEB-FIP adopto la siguiente metodología para calcular el ancho de fisura por cortante en vigas de hormigón armado.

$$w_k = 1.7k_w w_m \quad 2-11$$

$$w_m = S_{rm} \varepsilon_{sm} \quad 2-12$$

w_k : ancho máximo de fisura.

w_m : ancho medio de fisura.

$$S_{rm} = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \leq \frac{d-x}{\sin\alpha} \quad 2-13$$

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \left(\frac{V_{cd}}{V_s} \right)^2 \right] \geq 0.4 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad 2-14$$

$$\sigma_s = \frac{V_s - V_{cd}}{b_w d \rho_w} \frac{1}{\sin\alpha(\sin\alpha + \cos\alpha)} \geq 40.02 N/mm^2 \quad 2-15$$

Donde:

k_w : coeficiente por efecto de ángulo del estribo.

$$\alpha = 90^\circ \quad k_w = 1.2$$

$$\alpha = 45 - 60^\circ \quad k_w = 0.8$$

- s_{rm} : separación media de fisuras (mm).
 ε_{wm} : tensión en refuerzo del estribo dentro de s_{rm}
 c : recubrimiento de hormigón.
 s : espaciamiento de estribo (refuerzo en el alma) (mm).
 k_2 : 0.25
 ϕ : diámetro del estribo (refuerzo en el alma) (mm).
 k_1 : coeficiente por efectos de unión.
 para barras corrugadas: $k_1 = 0.4$
 para barras lisas: $k_1 = 0.8$
 $\rho_r = \frac{A_s}{(c+8\phi)(15\phi)}$
 A_s : área del refuerzo en el alma (mm²)
 x : altura del eje neutro (mm)
 σ_s : tensión en el estribo en la ubicación del estribo(N/mm²).
 E_s : módulo de Young (MPa)
 ρ_r : cuantía de refuerzo del estribo.
 V_s : fuerza cortante(N). V_{cd} : contribución de hormigón en la fuerza cortante (N).

2.3.4) EC2 EN-1992-1.

La segunda alternativa se presenta en la sección 7.3.4, el cálculo de achos de fisura, se detalla la ecuación.[5]

$$w_k = s_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad 2-16$$

Donde:

- $s_{r,max}$: es la separación máxima entre fisuras.
 ε_{sm} : es la deformación media en el refuerzo bajo la correspondiente combinación de cargas, incluyendo el efecto de las deformaciones impuestas y teniendo en cuenta los efectos del endurecimiento de la tensión. Sólo se considera la tensión de tracción adicional más allá del estado de deformación cero del hormigón al mismo nivel.
 ε_{cm} : es la deformación media del hormigón entre grietas.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}(1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad 2-17$$

Donde:

- σ_s : es la tensión en el refuerzo asumiendo una sección agrietadas. Para elementos pretensados, σ_s puede ser reemplazado por $\Delta\sigma_s$ la variación de tensión en el tendón pretensado desde el estado de deformación cero hasta un nivel similar del hormigón.
 α_e : es el ratio E_s/E_{cm}

$$\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_1 A'_p) / A_{c,eff} \quad 2-18$$

A'_p : es el área del tendón pre o post tensado dentro de $A_{c,eff}$

$A_{c,eff}$: es el área efectiva de hormigón en tensión que rodea el refuerzo o los tendones de pretensado de altura $h_{c,ef}$, donde $h_{c,ef}$ es el menor de $2.5(h - d)$, $(h - x)/3$ o $h/2$

ξ_1 : Es la relación ajustada de la resistencia de la adherencia teniendo en cuenta los diferentes diámetros del acero de pretensado y de refuerzo.

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\phi_s}{\phi_p}} \quad 2-19$$

ξ : Relación entre la resistencia de unión entre el pretensado y el refuerzo.

ϕ_s : Mayor diámetro de barra de acero de refuerzo

ϕ_p : Diámetro equivalente del tendón según:

$$\phi_p = 1.6\sqrt{A_p}$$

$\phi_p = 1.75\phi_{wire}$ para 7 hilos de alambre donde ϕ_{wire} es el diámetro del alambre.

$\phi_p = 1.2\phi_{wire}$ para 3 hilos de alambre donde ϕ_{wire} es el diámetro del alambre.

Si solo se usa acero pretensado para el control de fisura, $\xi_1 = \sqrt{\xi}$.

Tabla 2-6. Relación entre la resistencia de unión, entre los tendones y el acero de refuerzo

Acero de pretensado	ξ		
	pre tensado	Unido, pretensado	
		$\leq C50/60$	$\geq C70/85$
Barras lisas y alambres	No aplicable	0.3	0.15
Estándar	0.6	0.5	0.25
Hilos dentados	0.7	0.6	0.3
barras corrugadas	0.8	0.7	0.35

k_t es un factor dependiente de la duración de la carga.

$k_t = 0.6$ para carga de corto plazo.

$k_t = 0.4$ para carga de largo plazo.

Cuando la unión la unión de refuerzo es fijo razonablemente en el centro de la zona de tensión (espaciamiento $\leq 5(c + \phi/2)$), la separación máxima de fisuras final puede ser calculada da ecuación.

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi_x / \rho_{p,eff} \quad 2-20$$

Donde:

ϕ es el diámetro de la barra, cuando hay una mezcla diámetro de barras se usa un diámetro equivalente, ϕ_{eq} , puede ser usado. Para una sección con n_1 barras con diámetro ϕ_1 y n_2 barras de diámetro ϕ_1 la siguiente expresión se debería ser usada.

$$\phi_{eq} = \frac{n_1 \phi_1^2 + n_2 \phi_2^2}{n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2} \quad 2-21$$

c : recubrimiento del refuerzo longitudinal.

- k_1 es un coeficiente que toma en cuenta las propiedades de refuerzos de unión.
 = 0.8 para barras de unión alto.
 = 1.6 para barras con una superficie eficazmente plana (por ejemplo, tendones de pretensado)
- k_2 es un coeficiente que toma en cuenta la distribución de deformación.
 = 0.5 para flexión.
 = 1.0 para tensión pura.

Para casos de tensiones excéntricas para áreas locales, un valor intermedio de k_2 puede ser calculado de la siguiente relación.

$$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2\varepsilon_2 \quad 2-22$$

Donde ε_1 es el mayor y ε_2 es la menor tensión de tracción en la sección considerada, evaluada en la sección.

Los valores que toman k_3 y k_4 para usar en un país puedes ver el anexo. Los valores recomendados son 3.4 y 0.425 respectivamente.

Cuando el espacia de unión de refuerzo excede $5(c + \phi/2)$ o donde no hay refuerzo de enlace en la zona de tensión, se puede encontrar un límite superior al ancho de fisura asumiendo un espaciamiento máximo de fisuras.

$$S_{r,max} = 1.3(h - x) \quad 2-23$$

Donde el ángulo entre el eje del esfuerzo principal y la dirección del refuerzo, para elementos con refuerzo en dos direcciones ortogonales, es significativo $> 15^\circ$, entonces la separación de fisuras $S_{r,max}$ se puede calcular de la siguiente expresión.

$$S_{r,max} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{S_{r,max,y}} + \frac{\cos\theta}{S_{r,max,z}}} \quad 2-24$$

Donde:

θ es el ángulo entre el refuerzo en la dirección "y" la dirección de la tensión principal.
 $S_{r,max,y}$, $S_{r,max,z}$ son la separación de las fisuras calculadas en la dirección "y" y "z" respectivamente.

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{S_{mx}} + \frac{\cos\theta}{S_{my}}} \quad 2-25$$

$$S_{mx} = k_3c + k_1k_2k_4\phi_x/\rho_{p,eff,x} \quad 2-26$$

$$S_{my} = k_3c + k_1k_2k_4\phi_y/\rho_{p,eff,y} \quad 2-27$$

2.3.5) Modelo propuesto por De Silva (2008).

Dentro del ámbito del pretensado parcial cabe destacar el estudio realizado por De Silva [13]. Es el primer estudio de fisuración diagonal en piezas parcialmente pretensadas. El modelo propuesto para determinar el ancho de la fisura por cortante es desarrollado

asumiendo que hay una relación lineal entre el ancho de fisura (w) y deformación unitaria del estribo (ε_w).

$$w_k = k_w S_{m\theta} \varepsilon_w \quad 2-28$$

Donde w_k : ancho medio de fisura, $S_{m\theta}$: separación entre fisuras, k_w : coeficiente por efecto de ángulo del refuerzo a cortante y ε_w : deformación unitaria en el estribo.

El concepto esta basa en la idealización del complejo patrón de fisuras en una serie de fisuras paralelas que forman un ángulo θ con el eje longitudinal del miembro. Quiere decir que las fisuras de cortante presentan una distribución uniforme y un ángulo constante θ y separación entre fisuras $S_{m\theta}$, para el cálculo de estas se utiliza la ecuación 2-29.

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin\theta}{S_{mx}} + \frac{\cos\theta}{S_{my}}} \quad 2-29$$

Donde, S_{mx} es la separación vertical media entre fisuras (siendo el resultado cuando el miembro fue sometido a tensiones axiales), mientras S_{my} es la separación horizontal entre fisuras (siendo el resultado cuando el miembro fue sometido a tensiones transversales).

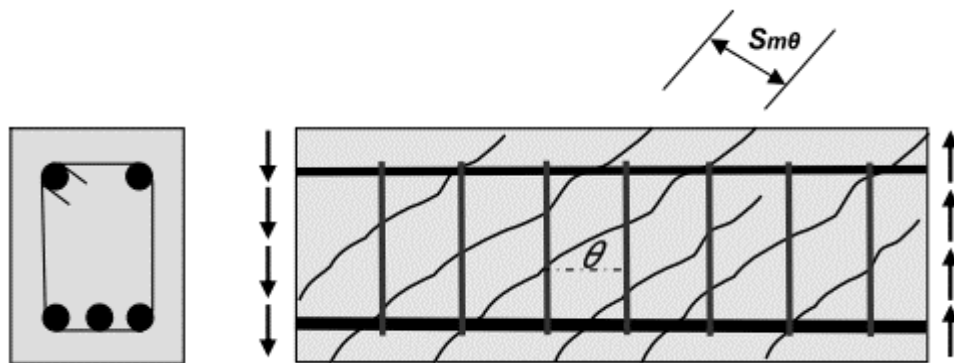
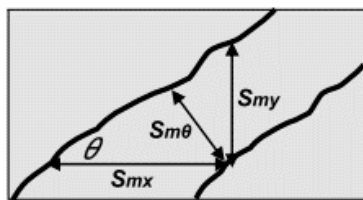
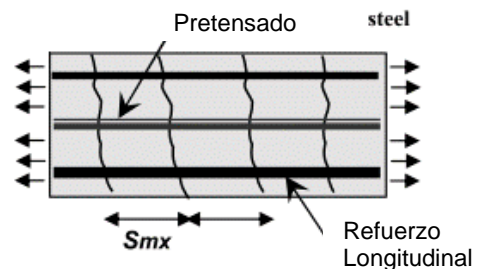


Figura 2-4. Distribución compleja de fisuras por cortante.

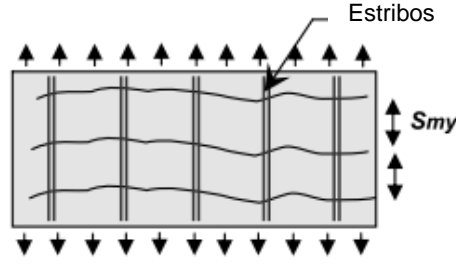
El cálculo de la separación entre fisuras es estimado con la expresión escrita en el CEB-FIP Model Code (1978). Las simplificaciones de los complejos patrones de fisura se muestran en la Figura 2-5.



(a) Separacion entre Fisuras



(b) fisuras verticales debido a la tensión axial



(c) Fisuras horizontales debido a las tensiones transversales.

Figura 2-5. Idealización de la distribución de fisuras por cortante.

Basado en las expresiones del modelo CEB-FIP (1978), se presenta las ecuaciones modificadas 2-30 y 2-31, para separación entre fisuras verticales (S_{mx}) y separación entre fisuras horizontales (S_{my}).

$$S_{mx} = 2\alpha_1 \left(c_{mx} + \frac{s_x}{10} \right) + 0.25k_1\alpha_1 \frac{d_{kx}}{\rho_{cx}} \quad 2-30$$

$$S_{my} = 2\beta_1 \left(c_{my} + \frac{s_y}{10} \right) + 0.25k_1\beta_1 \frac{d_{ky}}{\rho_{cy}} \quad 2-31$$

Donde:

c_x y c_y : distancia ver figura (ver Figura 2-6)

s_x : separación de la armadura longitudinal.

s_y : separación de armadura transversal.

k_1 : coeficiente el cual depende de las características de unión del refuerzo (0.4 para barras corrugadas y 0.8 para barras lisas).

k_2 : coeficiente que representa la influencia de forma del diagrama de tensiones (0.25 para tensión pura).

d_{kx} : diámetro del refuerzo longitudinal.

d_{ky} : diámetro de refuerzo en el alma (estribos).

$$\rho_x = \frac{A_x + A_{px}}{A_{c,ef}} \quad 2-32$$

ρ_x : es la cuantía de la armadura, según la ecuación 2-32.

A_x : área total del refuerzo longitudinal.

A_{px} : área del pretensado.

$A_{c,ef}$: área efectiva de hormigón $A_{c,ef} = 2.5(h - d_e)b_x$ (b_x ancho de la sección).

h : canto total de la sección de la viga.

d_e : canto efectivo incluyendo el tendón de pretensado y el refuerzo longitudinal.

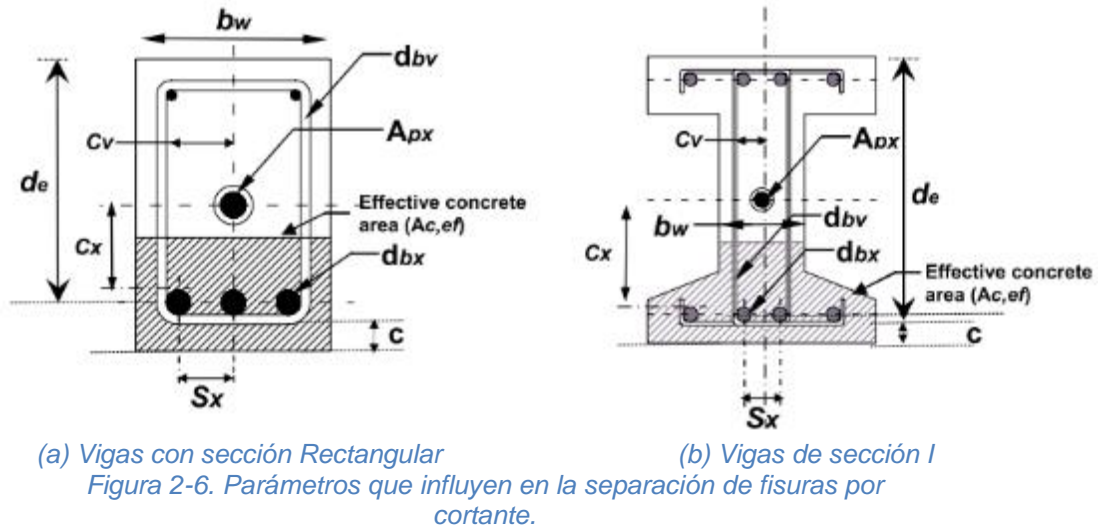
$$\rho_v = \frac{A_v}{b_w s_y} \quad 2-33$$

ρ_v : cuantía de refuerzo transversal.

A_v : área total del refuerzo en el alma.

b_w : ancho del alma en mm.

Adicionalmente el modelo propuesto toma en cuenta la presencia del tendón pretensado A_{px} en vigas de hormigón parcialmente pretensados. El área total del refuerzo longitudinal es distribuida en el área efectiva de hormigón $A_{c,ef}$. El área efectiva $A_{c,ef}$ es calculado considerando el centro de masas del acero (el cual es obtenido usando A_{px} y A_x). Los factores de correlación α_1 y β_1 , son obtenidos de la regresión de los valores experimentales. Siendo $\alpha_1 = 0.40$ y $\beta_1 = 0.35$.



Considerando las formulaciones anteriores y las características geométrica para cada viga se procede determinar los valores de separaciones medias (s_x) y anchos medios de fisuras teóricas el cual se detalla en la siguiente sección.

2.4) CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN EL ESTRIBO.

Para el cálculo de la deformación unitaria en el estribo [13], plantea la siguiente ecuación basado en el JSEC (2002).

$$\varepsilon_w = \frac{\sigma_w}{E_w} = \frac{V - V_{co}}{\left(\frac{A_w}{s}\right) z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) \cot \beta E_w} \quad 2-34$$

Donde:

σ_w : esfuerzo de cortante en la ubicación de la fisura (N/mm²).

E_w : módulo de Young (MPa).

A_w : área de refuerzo en el alma (estribo) (mm²).

α_s : ángulo entre el estribo y el eje del elemento.

$z = d/1.15$: d : canto efectivo (mm).

s : separación entre refuerzos del alma (mm).

β : ángulo de modelo de celosías 45°.

V : fuerza cortante (N).

V_{co} : Contribución del hormigón al cortante (N).

2.5) CÁLCULO DE ÁNGULO DE FISURAS.

Para el cálculo del ángulo de las fisuras se puede seguir con la propuesta del CEB-FIB (1996), AASHTO-LRFD y la propuesta [13].

Propone la siguiente metodología para el cálculo del ángulo para vigas de hormigón armado y pretensadas.

$$\cot \beta_r = 1.2 - 0.2 \left[\frac{\sigma_{xd}}{f_{ctm}} \right] \quad 2-35$$

$$f_{ctm} = 0.23 \{f'_c\}^{2/3} \quad 2-36$$

Donde:

$\sigma_{xd} = N_{sd}/A_c$ = esfuerzo de compresión (-).

f_{ctm} : esfuerzo a la tracción del hormigón.

2.5.1) AASHTO-LRFD.

Presenta una metodología simplificada, el cual se muestra en la siguiente ecuación.[18], el cual se obtiene directamente del círculo de Mohr's como se muestra en la Figura 2-7.

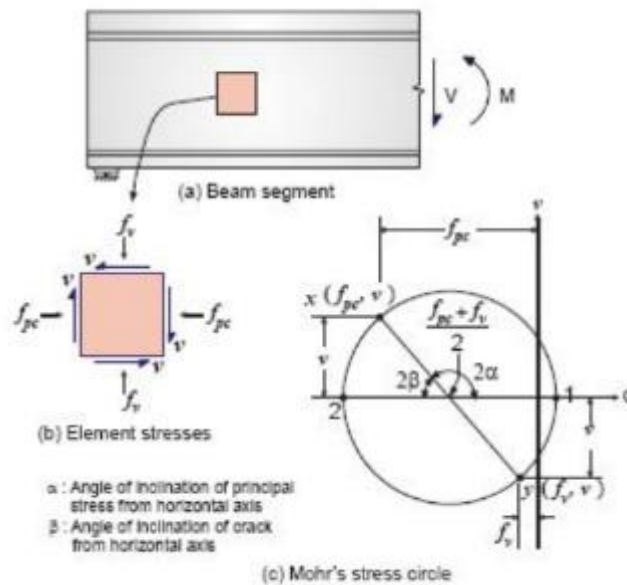


Figura 2-7. Distribución de esfuerzos en el hormigón.

Las ecuaciones 4-38 y 4-39 son empleadas para el cálculo con las unidades que se especifican.

$$\cot \theta = 1.0 + 3 \left[\frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}} \right] \leq 1.8 \quad 2-37$$

Donde las unidades de los esfuerzos están de ksi.

$$\cot \theta = 1.0 + 0.095 \left[\frac{f_{pc}}{\sqrt{f'_c}} \right] \leq 1.8 \quad 2-38$$

Cuando las unidades de los esfuerzos están en psi.

Cuando el esfuerzo de axial de compresión del pretensado es $f_{pc} = 0$ (elementos no pretensados), $\cot \theta$ es igual a 1 ($\theta = 45^\circ$).

2.6) ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES.

Se detalla el procedimiento de análisis de imágenes digitales

2.6.1) Procesamiento digital de imagen.

Para desarrollar los conceptos de procesamiento de imagen es necesario entender cómo se forman los colores de la luz considerando los colores primarios, en realidad existen dos sistemas de colores primarios: colores luz y colores pigmento.

Los colores luz son producidos por luces (en el monitor, televisión, etc.), también es llamado sistema RGB, esto por los colores primarios son el rojo, el verde y el azul (RGB de las siglas en ingles). Para representar un color en el sistema se le asigna valores entre 0 y 255, para cada uno de los componentes (Rojo, Verde y Azul) con la siguiente notación (255,0,0).

La imagen digital se puede definir como una función bidimensional $f(x, y)$, en el cual x e y corresponde a las coordenadas en un plano y la amplitud f el cual es denominada intensidad o nivel de gris en el punto de análisis, cuando las coordenadas y la amplitud son finitos (cantidades discretas), esta función se denomina imagen digital, una imagen digital estará compuesta por un número finito de elementos llamados píxeles, cada uno de los cuales con un valor y una posición particular.

Un píxel, es la unidad mínima de una imagen, el cual pertenece a un punto de una pantalla o en una impresora, cada píxel se compone por tres valores de colores, mediante la combinación de los tres colores, rojo, verde y azul, el píxel o punto adopta un color particular.

El procesamiento digital de las imágenes, es un tema muy amplio en el que intervienen, la física, matemática, computación e ingeniería. Forman parte de este proceso la adquisición o captura, procesamiento, segmentación, descripción, reconocimiento e interpretación, el objetivo de este es mejorar y resaltar algunos detalles.

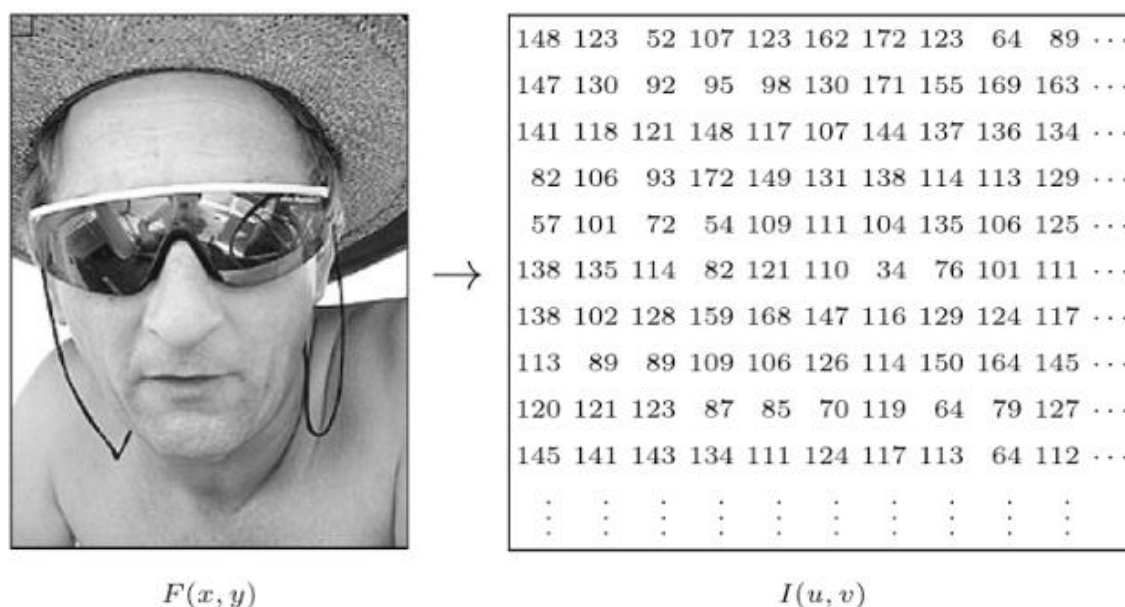


Figura 2-8. Transformación de una imagen continua de escala de grises $F(x,y)$ a una imagen digital discreta $I(u,v)$. [19]

Existen un campo amplio en el cual se utiliza el procesamiento digital de imagen, para resolver diversos problemas, como, por ejemplo, imágenes de rayos x, imágenes de resonancias magnéticas, etc.

De igual manera existen estudios anteriores de procesamientos de imágenes, aplicados al estudio de patrones de fisura en elementos de hormigón armado.

El procesamiento de imágenes y la fotogrametría se está utilizando para realizar mediciones en diferentes investigaciones, se emplearon la fotogrametría para realizar el monitoreo y control de fisuras, [20], realiza el control y seguimiento del origen de fisuras y la evolución en los elementos de hormigón, para ello desarrollaron un software para detectar fisuras en las estructuras en base a las fotografías.

Se han realizado automatizaciones para detección, clasificación y monitoreo de fisuras en túneles subterráneos. Se capturaron y almacenaron imágenes y a partir de ello, con las imágenes en escala a grises utilizando técnicas de procesamiento de imágenes morfológicas. [21]

Con se ha detallado en las secciones para el diseño de elemento parcialmente pretensados parte del diseño el control de las fisuras es importante, para la campaña de las vigas se obtuvieron fotografías digitales, para los diferentes niveles de carga, con la finalidad de realizar un monitoreo y seguimiento de la evolución de las fisuras para cada nivel de carga.

Por otra parte, para obtención del patrón de fisuras a partir de una imagen digital se ha desarrollado programa en Matlab [22], cabe recalcar que el programa se encuentra en desarrollo, a continuación desarrollamos los principales criterios para detectar y analizar las fisuras para las vigas de la campaña experimental.

2.6.2) Filtrado espacial.

Filtrado espacial o proceso de vecindad es una operación de imagen en la que cada valor de píxel $f(x, y)$ es cambiado por una función de las intensidades de píxeles en un vecindario alrededor de píxel (x, y) . Se compone principalmente de 4 pasos:

1. Selección de un punto central (x, y) en la imagen.
2. Realización de una operación n que implica sólo los píxeles en un entorno predefinido alrededor de (x, y) .
3. Dejar que el resultado de esa operación sea la respuesta del proceso en ese punto, puede reemplazar el punto anterior o crear una nueva matriz con sólo los valores de respuesta.
4. Repitiendo el proceso para todos los píxeles de la imagen. Si las operaciones realizadas en los píxeles de los vecindarios son lineales, la operación se denomina filtrado espacial lineal.

2.6.3) Detección de bordes y contornos

Los bordes se pueden describir aproximadamente como la posición de la imagen donde la intensidad local cambia distintamente a lo largo de una orientación particular. Cuanto más fuerte es el cambio de intensidad local, mayor es la evidencia de un borde en esa posición. En matemáticas, la cantidad de cambios con respecto a la distancia espacial se conoce como la primera derivada de una función, y así comenzamos con este concepto para desarrollar nuestro primer detector de borde simple.[19]

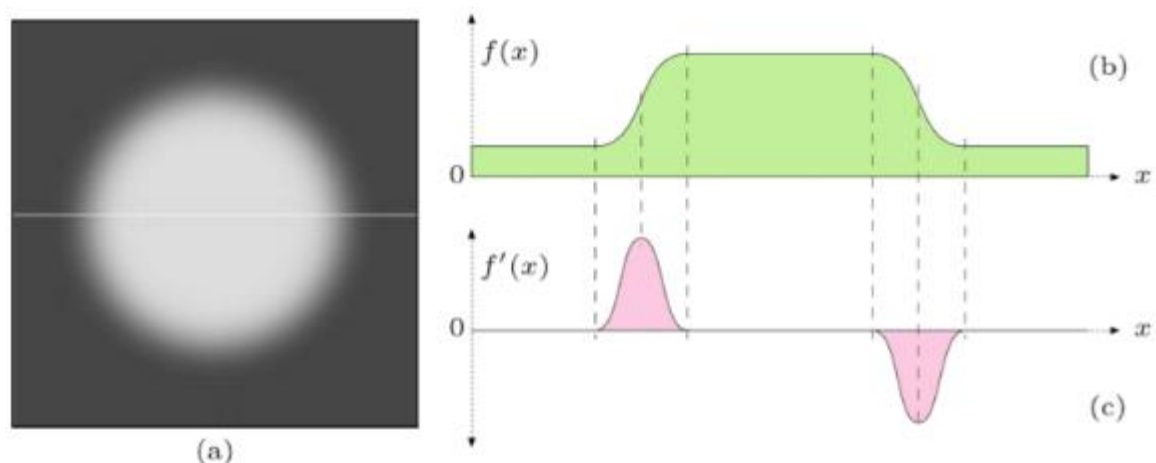


Figura 2-9. Ejemplo de una imagen y la primera derivada en una dimensión: imagen original (a), perfil horizontal de intensidad $f(x)$ a lo largo del centro de la imagen (b), y primera derivada $f'(x)$ (c).[19]

CAPÍTULO 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

3.1) INTRODUCCIÓN.

La campaña experimental forma parte del proyecto de investigación PROPOSE existen dos campañas, la primera ya realizado consta de 8 vigas isostáticas y la segunda 7 vigas continuas de hormigón parcialmente pretensado en el cual están en desarrollo, con la finalidad de validar el método de diseño seccional y el modelo propuesto en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Como parte de la campaña se ha planteado ensayos a flexión y cortante, el presente trabajo enfocara en realizar el análisis de las fisuras debido al cortante.

3.2) OBJETIVOS.

Partiendo de trabajos realizados en campañas anteriores se tiene los siguientes objetivos.

- Describir la metodología de instrumentación y obtención de datos experimentales.

- Describir las características del elemento estructural en consideración.
- A partir de los datos experimentales determinar el comportamiento las fisuras debido a cortante.

Se procede con la descripción de las características geométricas de las vigas, descripción de la instrumentación empleado y el procedimiento del mismo y recopilación de la información.

3.3) DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA VIGA.

Esta campaña experimental se propone estudiar el cortante y flexión en elementos en doble T se muestra en la Figura 3-1(a), las unidades se muestran en milímetros. Se cuenta con 8 elementos; 4 con un espesor de alma de 120mm y 4 con espesor de 180mm como se muestra en la Figura 3-1.(b) y (c) respectivamente. Las vigas son de 8 metros de largo y canto de 50cm, las dimensiones de los elementos intentan guardar parecido y relación con los de un puente.

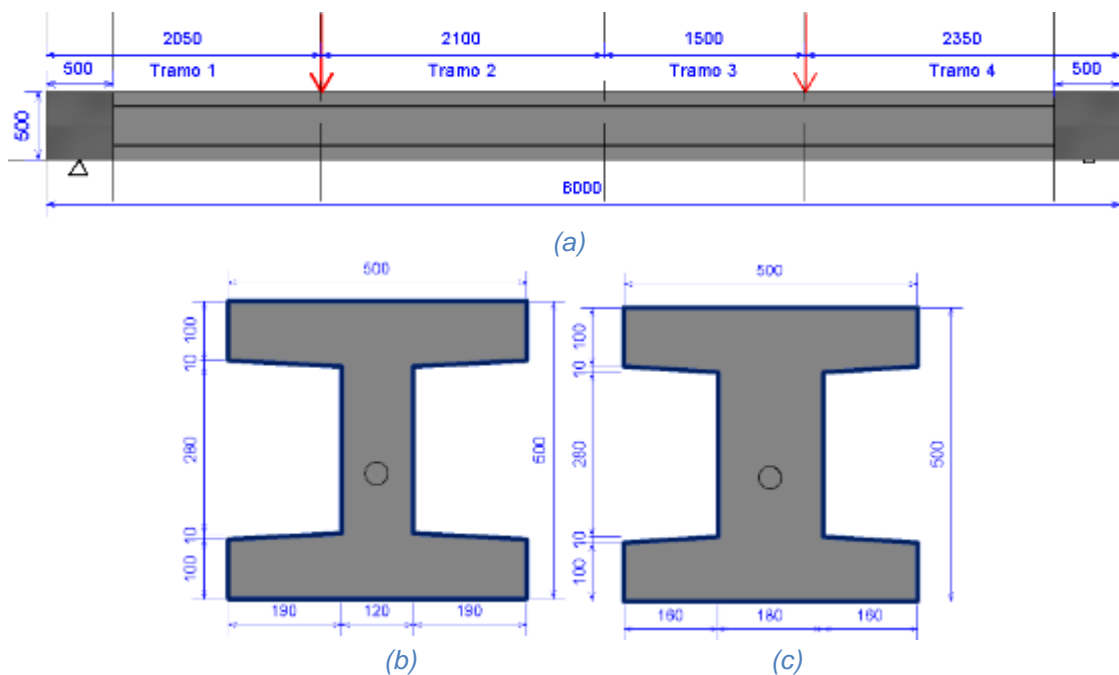


Figura 3-1. Disposición de la Viga Isostática.

Sobre cada viga se realizan 2 ensayos, uno en extremo y el otro en la otra, las vigas con espesor de alma de 120mm (viga I120), se ensayan a cortante en ambos lados y las vigas con espesor de alma de 180mm (I180) se ensayan a cortante por un lado y a flexión pura por el otro lado.

El trazo del pretensado que recorre las vigas no es simétrico, en un lado el trazo es inclinado con una pendiente de 5° y en el otro el trazo es inclinado. El lado con trazo inclinado de pretensado siempre se ensaya a cortante. En el lado con trazo recto dependerá del tamaño del alma. Se escogió que el trazo del pretensado sea inclinado en un extremo por similitud con los casos reales, donde las zonas de los puentes con mayor cortante son las zonas cercanas a los apoyos donde el pretensado no es horizontal. La zona con trazo recto de pretensado se asemeja mucho a la zona central de los vanos donde el momento es más alto.

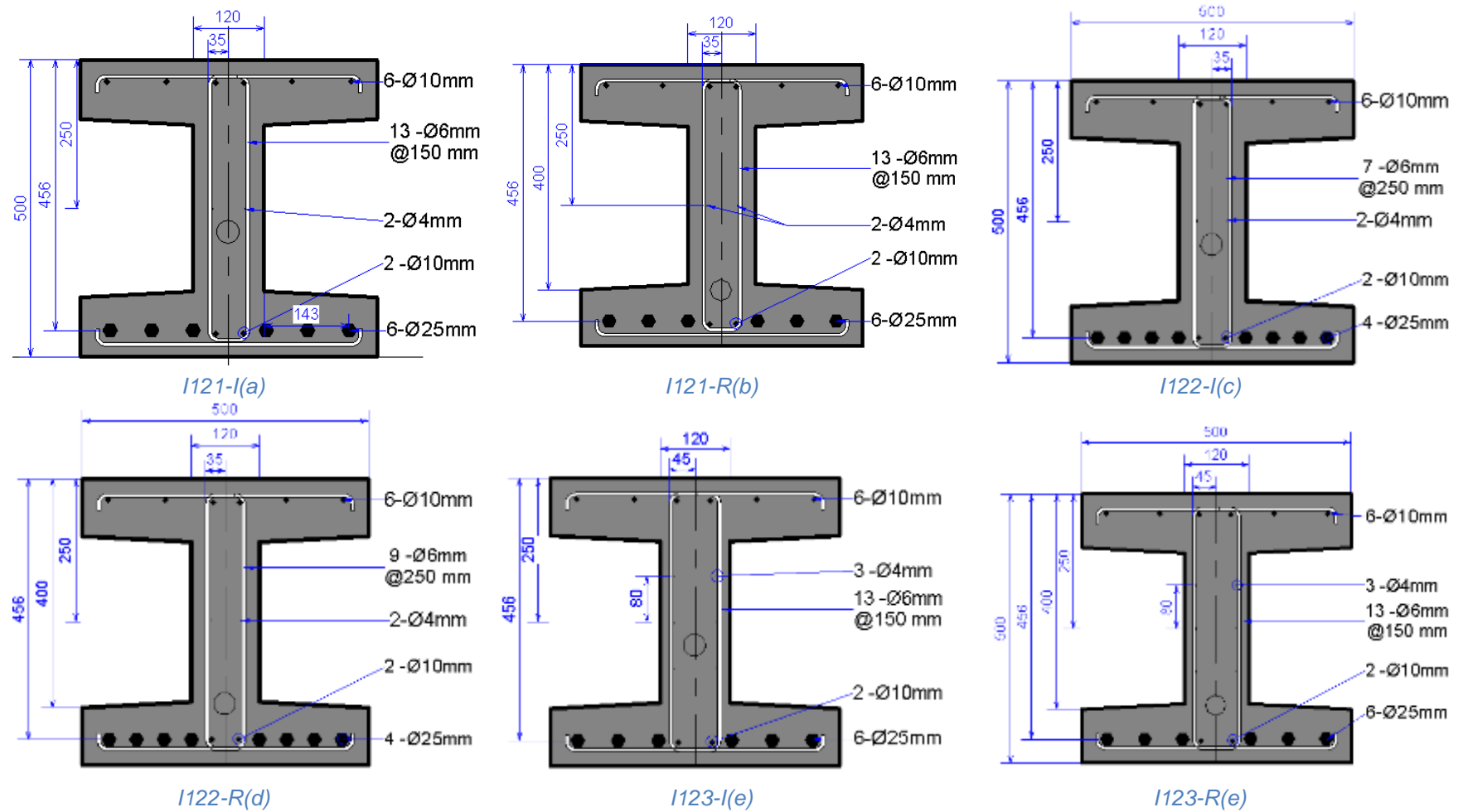


Figura 3-2.Secciones de transversales de vigas.

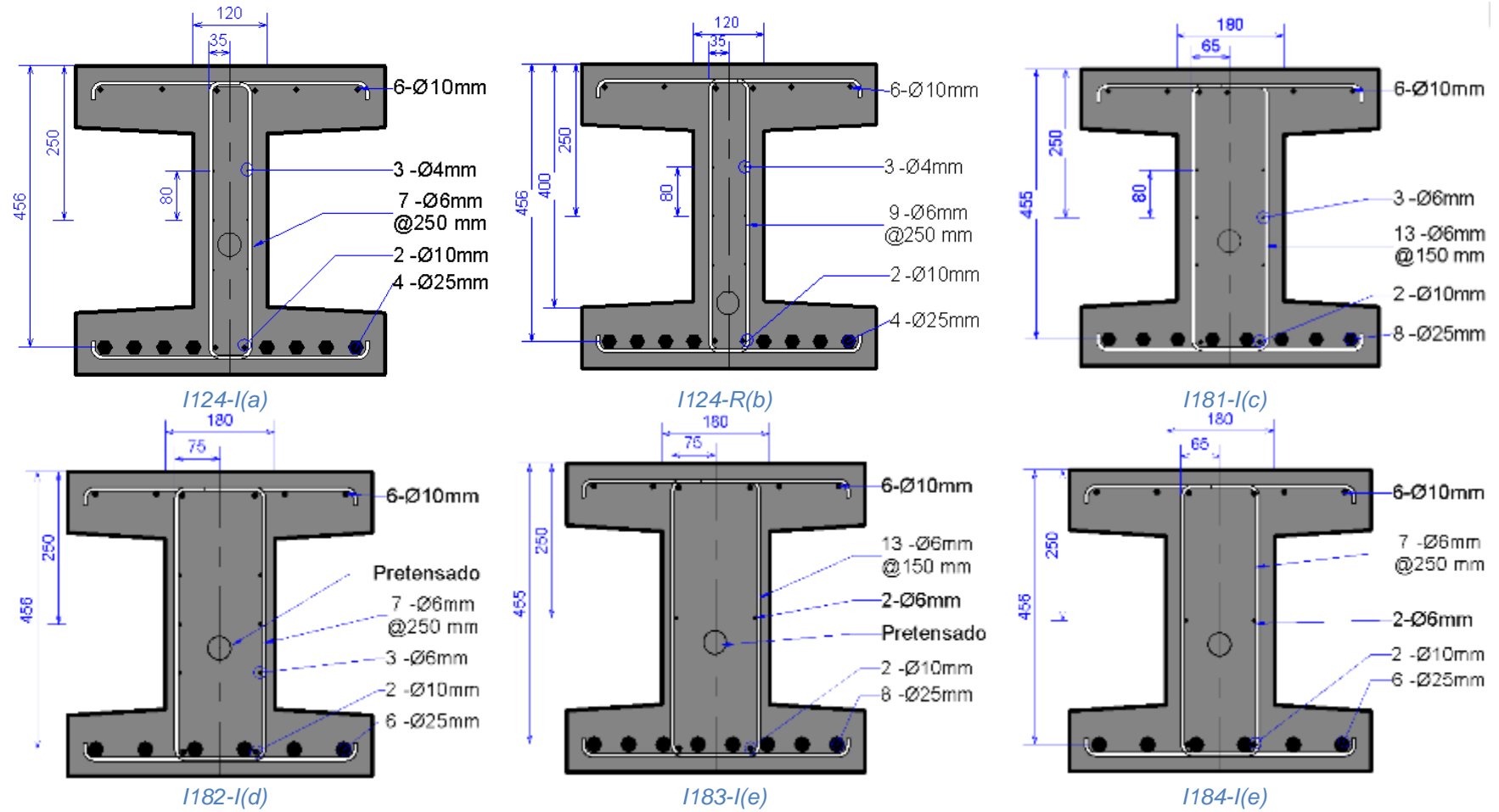


Figura 3-3. Secciones de transversales de vigas.

Tabla 3-1. Distribución de armadura en vigas "I".

N°	Viga	Dimensiones (mm)		Armadura Pasiva			Armadura Activa		Estribos		σ _{cgp} (Mpa)		
		Alma	Recubrimiento	Superior	Inferior (mm2)	Alma (mm2)	Área P (mm2)	Fuerza (kN)	Esp. (mm)	Øsw (mm)			
1	I121I	120	25	6Ø10 (471)	6Ø25+2Ø10 (3102.4)	2Ø4 (25.2)	4x0.6"(600)	787.2	150	6(28.3)	5.63		
2	I122I		15		8Ø25+2Ø10 (4084.2)				250				
3	I123I				25	6Ø25+2Ø10 (3102.4)	6Ø4 (75.6)	2x0.6"(300)	393.6		150	2.82	
4	I124I		8Ø25+2Ø10 (4084.2)			250							
5	I121R		15		6Ø25+2Ø10 (3102.4)	2Ø4 (25.2)	4x0.6"(600)	787.2	150		5.63		
6	I122R				8Ø25+2Ø10 (4084.2)				250				
7	I123R				25	6Ø25+2Ø10 (3102.4)	6Ø4 (75.6)	2x0.6"(300)	393.6			150	2.82
8	I124R					8Ø25+2Ø10 (4084.2)						250	
9	I181I	180	15	6Ø10 (471)	8Ø25+2Ø10 (4084.2)	6Ø6 (169.8)	4x0.6"(600)	787.2	150	6(28.3)	5.01		
10	I182I				6Ø25+2Ø10 (3102.4)				250				
11	I183I		25		8Ø25+2Ø10 (4084.2)	2Ø6 (56.6)	2x0.6"(300)	393.6	150		2.50		
12	I184I				6Ø25+2Ø10 (3102.4)				250				

De acuerdo a las secciones transversales antes mostradas se realiza un resumen de distribución de armadura pasiva, activa, esfuerzo de compresión debido al pretensado, fuerza de pretensado y espaciamiento de estribos, en la Tabla 3-1, la armadura pasiva es del tipo B-500-SD, la distribución de armaduras de refuerzo negativo para todas las vigas es de 6 Ø 10mm.

La distribución de armadura positiva para las vigas I121I, I123I, I121R, I123R, I182I, I184I es de 6Ø25+2Ø10 que representa un área de 3102.4mm² y las vigas I122-I, I124-I, I122R, I124R, I181I, I183I es de 8Ø25+2Ø10 que representa un área de 4084.2mm².

Además, se ha dispuesto refuerzos longitudinales en el alma, las vigas I121-I, I122-I, I121-R e I122-R, tiene de refuerzo de 2Ø4 (25.2 mm²), las vigas I183-I e I184-I, tienen de refuerzo 2Ø6 (56.6 mm²), las vigas I123-I, I124-I, I123-R e I124-R, tienen de refuerzo 6Ø4(75.6 mm²) finalmente las vigas I181-I e I182-I, tiene de refuerzo 6Ø6(169.8 mm²), se realizó la variación de diámetro de los refuerzos, las vigas que cuentan con 6 refuerzos se ha distribuido 3 varillas a cada lado espaciados a 80mm, y las que tienen dos refuerzo se distribuyen una a cada lado del alma, en las secciones mostradas en la Figura 3-2 y Figura 3-3, se puede observar la distribución.

Los refuerzos verticales (cercos) se han utilizado varillas de Ø6 (28.3 mm²), están dispuesto con espaciamientos de 150mm y 250mm.

Las armaduras activas se han dispuesto cuatro cordones de 150mm² de acero Y-1860-S7, y se muestran en dos cuantías diferentes de 4x0.6"(600mm²) y 2x0.6"(300mm²) y la fuerzas de pretensado son de 787,2 kN y 393.6 kN, las distribuciones varían como se detalla en la Tabla 3-1, aportan compresión al hormigón de 5.63, 2.82, 5 y 2.5 Mpa.

Las combinaciones de recubrimiento, refuerzos pasivos, refuerzos activos, refuerzos verticales, detallas es con la finalidad de realizar el análisis de la influencia en el patrón de fisuras.

Por otra parte, también se tienen en cuenta las resistencias a la compresión del hormigón los cuales se muestra en la Tabla 3-2, los valores obtenidos de los ensayos de compresión (f_c), y también se muestran los valores de resistencia a la tracción (f_{ctm}), obtenidos a partir del ensayo brasileño de tracción indirecta.

Tabla 3-2. Características del hormigón y tensión de pretensado.

N°	Viga	f_c (Mpa)	f_{ctm} (Mpa)
1	I121I	69.7	5.13
2	I122I	50	4.74
3	I123I	43.9	4.15
4	I124I	59.5	4.60
5	I121R	69.7	5.13
6	I122R	50	4.74
7	I123R	43.9	4.15
8	I124R	59.5	4.60
9	I181I	59	4.56
10	I182I	60	5.87
11	I183I	42	4.94
12	I184I	63.9	5.06

3.4) INSTRUMENTACIÓN.

Durante la realización de esta campaña se han usado una gran variedad de elementos para instrumentar las vigas. Se han usado sensores para medir las deformaciones en las armaduras, deformación en la superficie del acero, flechas de la viga y reacciones en los apoyos.

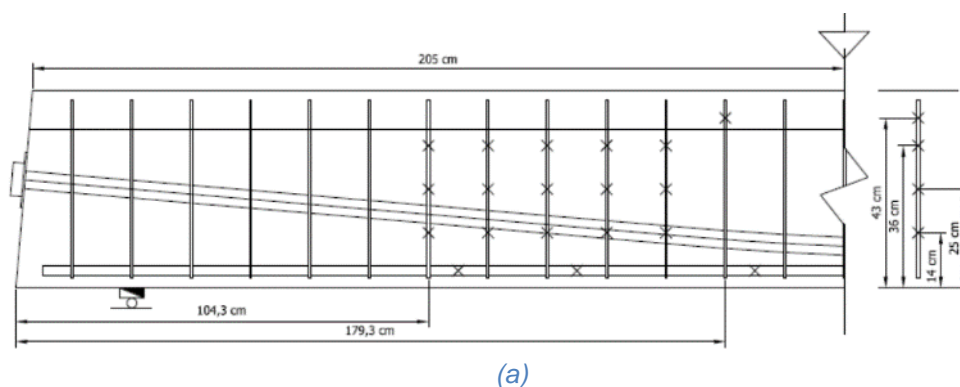
Para el control de las armaduras se han usado galgas extensiométricas, unos sensores que se adhieren a las armaduras antes del hormigonado y nos permiten saber en cada momento la deformación de las armaduras. En la Figura 3-4 y Figura 3-5 se muestra la posición y distribución de las galgas.

Para calcular las deformaciones en la superficie del hormigón se han usado dos metodologías. La primera y más comúnmente utilizada es la de colocar transductores de desplazamiento (pistones con una resistencia eléctrica interior) que se adhieren al hormigón una vez este ha fraguado para medir el desplazamiento relativo de las dos puntas del pistón. La segunda metodología consiste en la fotogrametría se utilizó una cámara fotográfica Nikon D5200 digital SRL, esta realiza una foto a la viga cada 60 segundos. Al analizar las diferentes fotos se puede ver la evolución de las fisuras y cuál es el desplazamiento relativo de los puntos presentes en la fotografía. La resolución de este método está muy relacionada con la capacidad de la cámara empleada para realizar las fotos y las dimensiones de la zona de estudio.

Para el cálculo de flechas y descensos de apoyo, se han usado transductores de desplazamiento y medidores láser, este incide sobre un elemento de recepción tipo fotosensible que permite determinar electrónicamente las variaciones de posición del punto de incidencia. El tiempo hasta que la señal vuelve determina la distancia del objeto al medidor.

En los apoyos se colocaron células de carga para poder conocer en todo momento cual era la carga que realmente le llegaba al apoyo. Por motivos de estabilidad y capacidad, en los apoyos con más carga se colocaron dos células de carga.

EL pistón del Laboratorio técnico de estructuras Lluís Agulló de la UPC (LTE) tiene una célula de carga y un transductor de desplazamiento de gran precisión y permite controles tanto por carga como por desplazamiento.



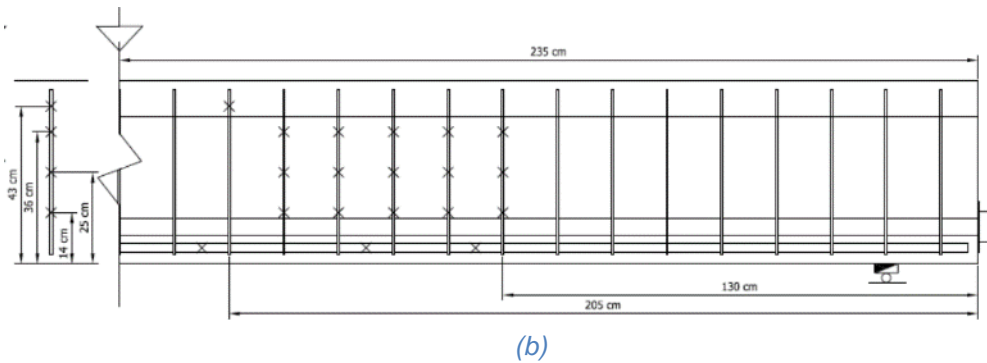


Figura 3-4. Disposición de galgas en estribos ($s=150\text{mm}$) y refuerzo longitudinal (a) trazo de pretensado inclinado (b) trazo de pretensado recto.

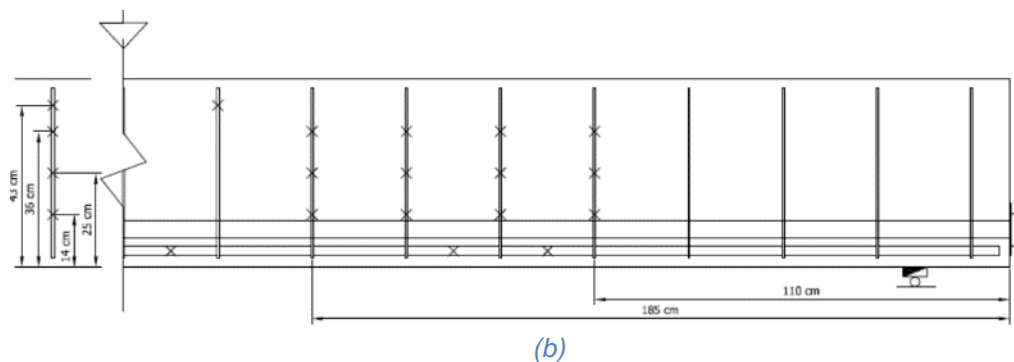
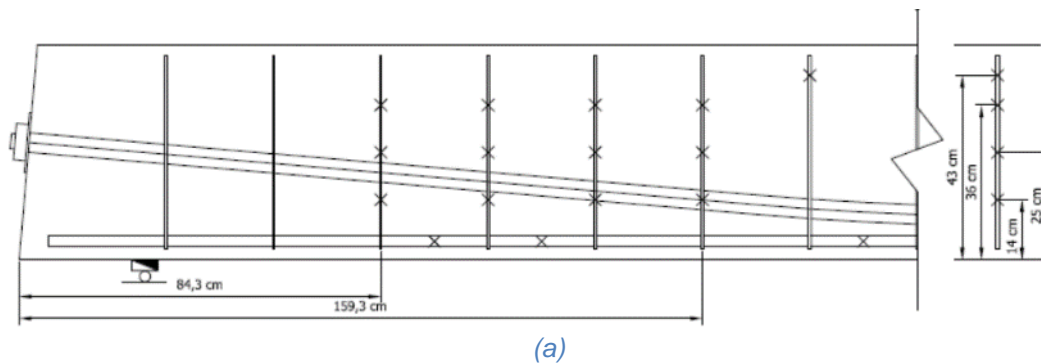


Figura 3-5. Disposición de galgas en estribos ($s=250\text{mm}$) y refuerzo longitudinal (a) trazo de pretensado inclinado (b) trazo de pretensado recto.

3.5) METODOLOGIA DE ENSAYO.

El ensayo a cortante se procede con la aplicación de la carga de cuerdo a los putos detallados en la Figura 3-1, para el tramo con trazo de pretensado inclinado en las ocho vigas y para el tramo con trazo de pretensado recto solo en las vigas con espesor de alma 120mm.

El procedimiento de carga durante el ensayo presenta la secuencia que se muestra en la Figura 3-6, se muestra una carga cíclica considerando las situaciones y combinaciones de carga cuasi permanente (Q_{qua}), frecuente (Q_{frec}), característico ($Q_{caracter}$), carga de plastificación (Q_{plast}) y carga máxima (Q_{max}). Se considera cuatros ciclos de carga y descarga considerando como carga máxima de estos ciclos la carga característica, y un ciclo de carga y descarga que llega hasta la carga de plastificación y finalmente se llega hasta la carga máxima. Es necesarios indicar que cuando las

cargas aplicada llegan a los putos las combinaciones de cargas mencionadas el valor de esta se mantiene constante, con la finalidad de acentuar los efectos de las cargas y además obtener imágenes que corresponde a esta posición de carga.

El procedimiento de adquisición para la obtención de imágenes digitales, inicia con la preparación la superficie de la viga, con la finalidad de obtener referencias en algunas vigas se realizan cuadrículas y se indican la posición de los estribos. Se realiza la adquisición de las imágenes digitales con un periodo de 60 segundos, estas permiten monitorizar y evaluar la evolución del patrón de fisuras.

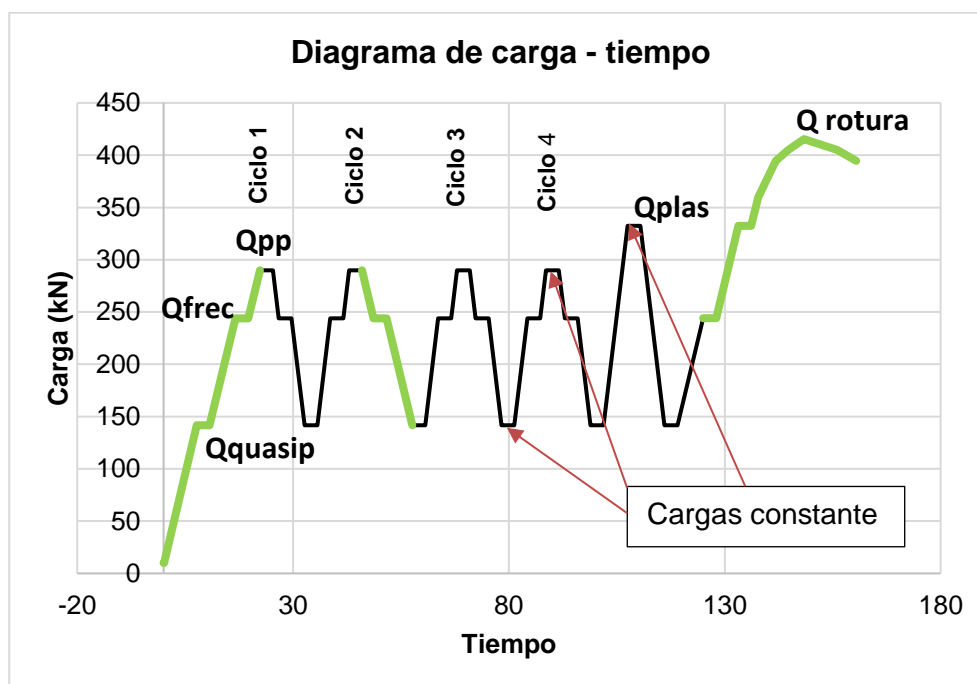


Figura 3-6. Secuencia de carga vs tiempo (Q vs T).

En la tabla 3-3, se muestra las diferentes cargas para cada uno de las vigas, las vigas I121I, I121R, I122I, I122R y I182I tienen secuencias de cargas iguales, así también las vigas I183 y I184.

Tabla 3-3. Relación de carga para cada uno de las vigas.

N°	Viga	Cargas (kN)				
		Qquasip	Qfrecu.	Qpp	Qplas	Qrotura
1	I121-I	183	315	375	429	537
2	I122-I	183	315	375	429	537
3	I123-I	142	244	290	322	415
4	I124-I	153	263	312	350	447
5	I121-R	183	315	375	429	537
6	I122-R	183	315	375	429	537
7	I123-R	142	244	290	322	415
8	I124-R	153	263	312	350	447
9	I181-I	207	357	424	486	607
10	I182-I	183	315	375	429	537
11	I183-I	157	270	321	368	460
12	I184-I	157	270	320	363	427

3.6) CARGA DEFORMACIÓN DE LAS VIGAS.

La campaña experimental se obtiene los diagramas cargas - deformación de en la posición de la carga, estas se muestran en la Figura 3-7, Figura 3-8 y Figura 3-9. Se puede apreciar que las vigas con mayor compresión debido al pretensado tienen mayores cargas últimas. La viga I123R presenta una falla dúctil.

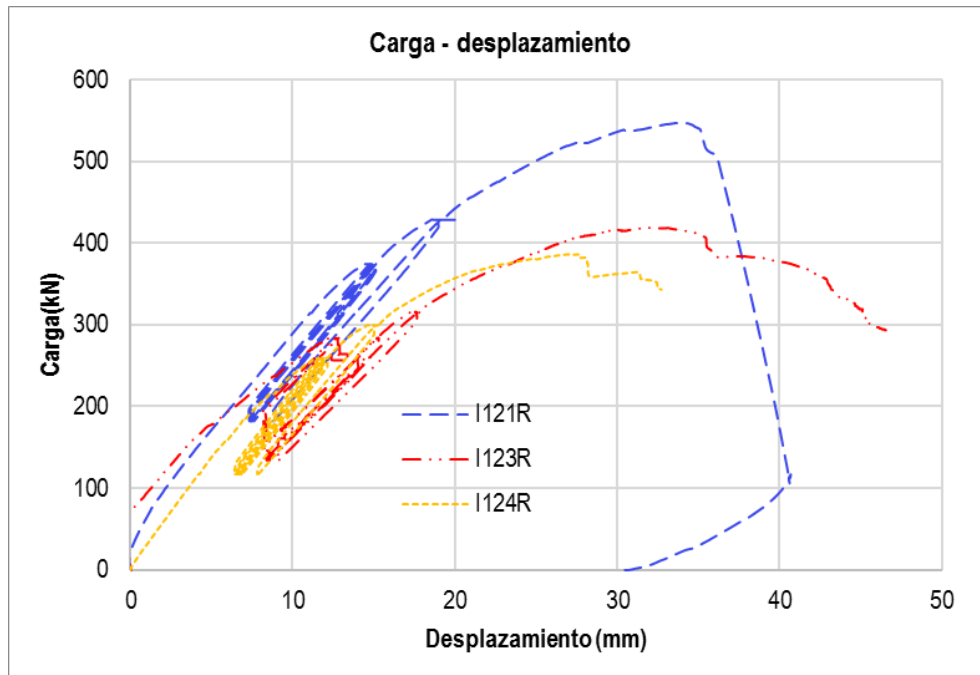


Figura 3-7. Carga-desplazamiento de vigas I121R, I123R e I124R

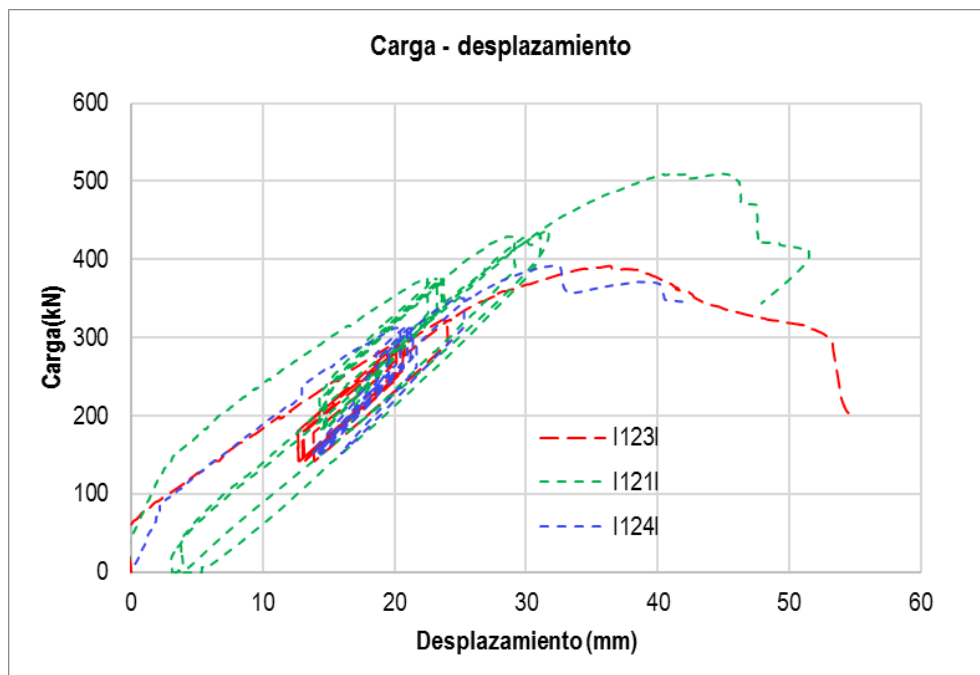


Figura 3-8. Carga-desplazamiento de vigas I121I, I123I e I124I

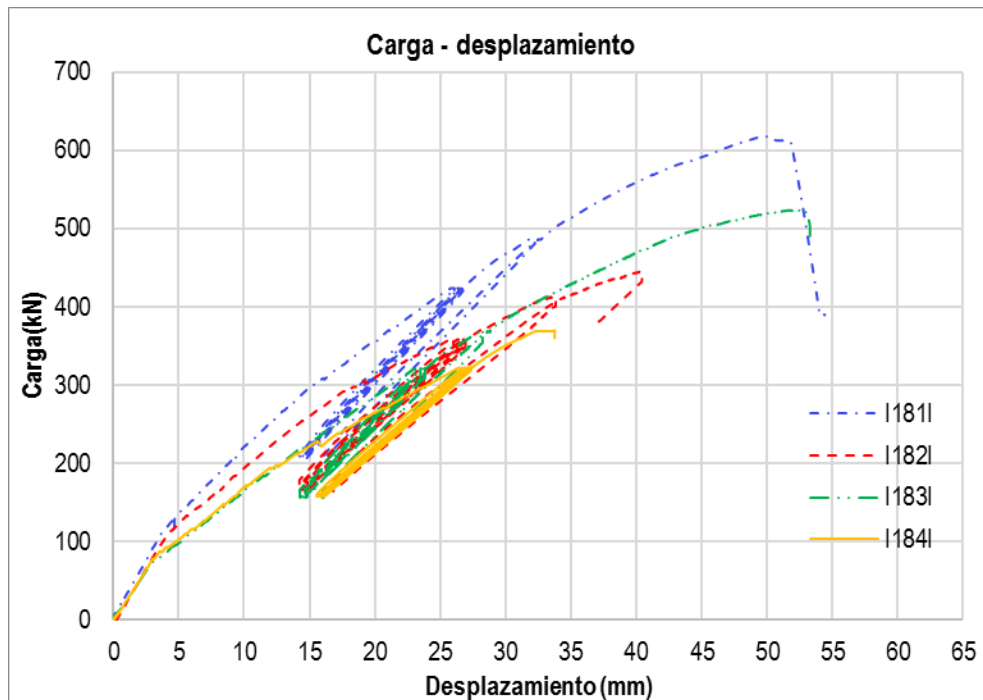


Figura 3-9. Carga-desplazamiento viga I181I, I182I, I183I e I184I

Las vigas pretensado alto presenta fallas más frágiles,

3.7) RESISTENCIA A CORTANTE

En la siguiente figura podemos ver la resistencia a cortante de cada pieza, tanto los valores predichos por las normativas como los propuestos por la formulación de Mari et al y los resultados experimentales.

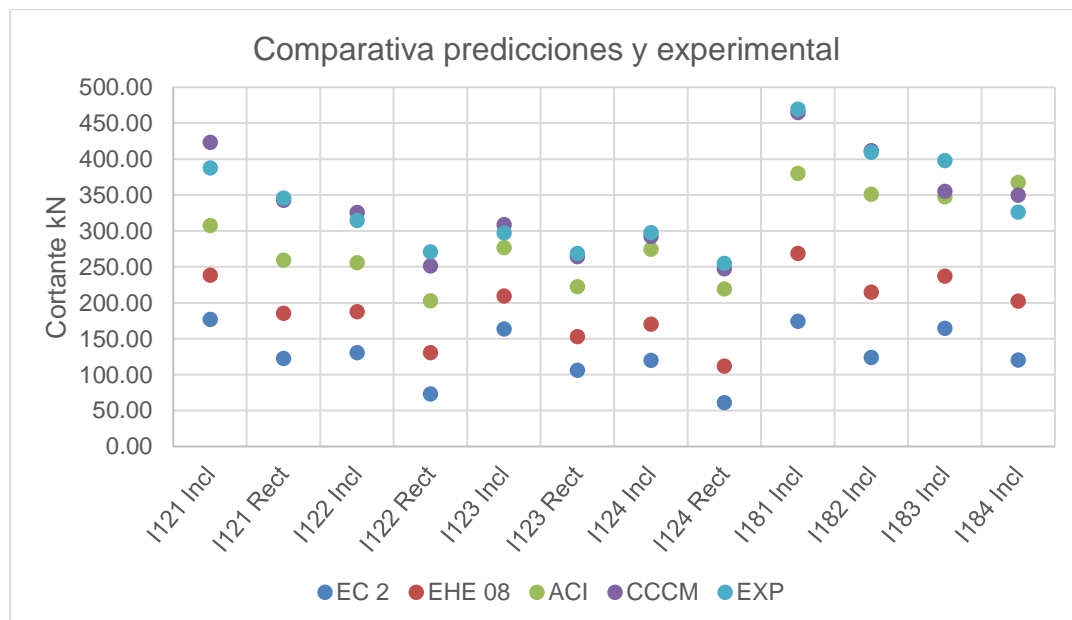


Figura 3-10. Comparación de la resistencia a cortante de las piezas.

3.8) RESULTADOS DE DEFORMACIÓN EN ESTRIBOS

Se obtienen resultados para deformación de estribos, en la Figura 3-11, se muestra la relación carga vs tiempo, los puntos rojos indican las posiciones de carga en el cual se obtienen la deformación en los estribos, que son para el punto inicial, posición de carga cuasi permanente, carga frecuente y característica.

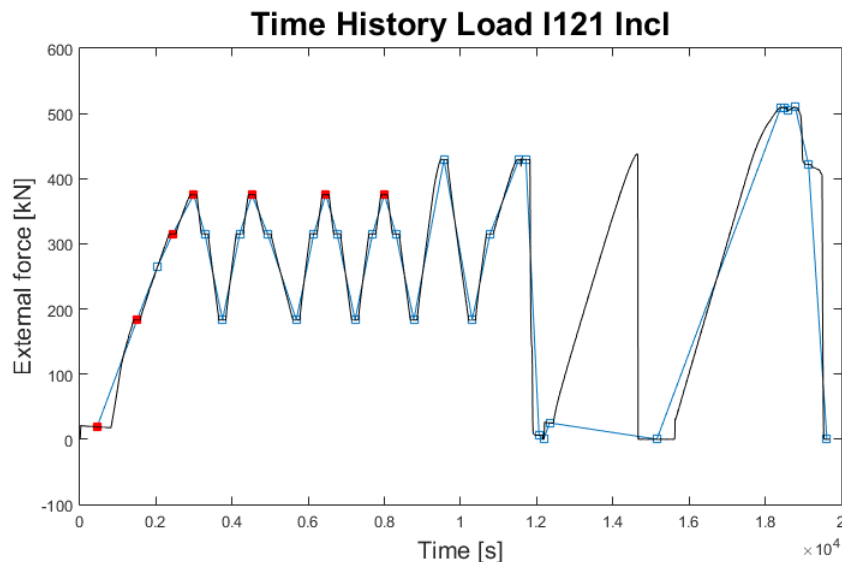


Figura 3-11. Carga vs Tiempo.

En la Figura 3-12, muestra la imagen del patrón de fisuras y la posición de los estribos, estos se relacionan con los resultados mostrados en la Figura 3-13, se aprecia el comportamiento de los esfuerzos en los tres puntos de control para cada estribo. En los estribos 1 y 3 en la en la galga "B" llegan a su capacidad máxima y han llegado a la rotura, es debido hay fisuras que atraviesan a estos estribos.

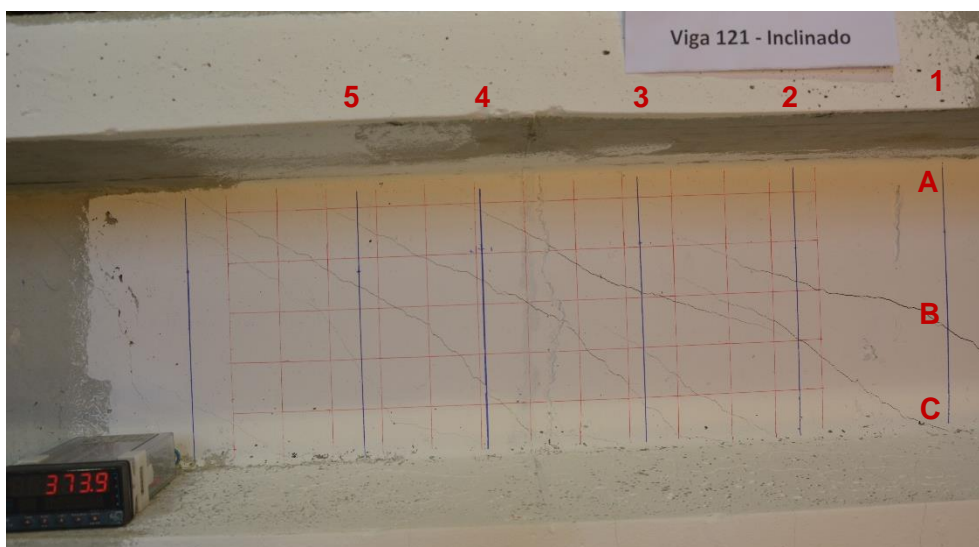


Figura 3-12. Distribución de estribos en la viga I121I

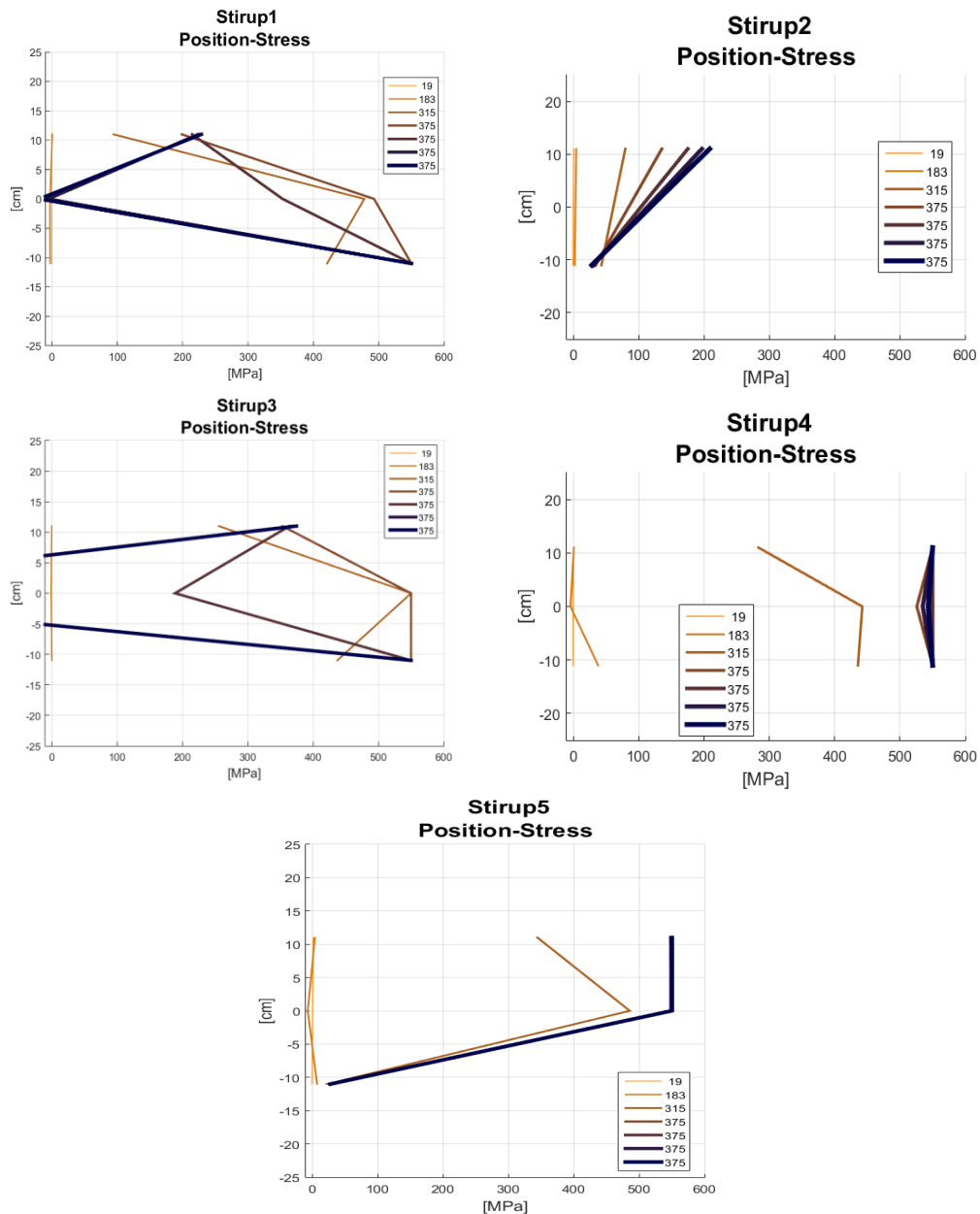


Figura 3-13. Esfuerzo en los estribos.

Se puede apreciar que para cargas de 19 y 183 kN, la tensiones en los estribos son pequeñas, a este nivel de cargas aún no se han formado las fisuras. En el momento que se generan las fisuras, para la carga frecuente las tensiones son considerables.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE PATRÓN DE FISURAS POR CORTANTE.

4.1) INTRODUCCIÓN.

Con la finalidad de analizar los efectos de los diferentes parámetros en el patrón de fisuras, se realiza procesamiento de las imágenes digitales para ello se emplea los criterios descritos en la sección 2.6, el cual consiste en obtener el patrón de fisuras y utilizando programa de detección de bordes desarrollados en Matlab por Luis Sánchez.

4.2) OBJETIVOS.

Los objetivos de este capítulo son:

- Analizar la separación entre fisuras, ángulos medios y ancho de las fisuras.
- Observar la influencia de los parámetros geométricos en la fisuración diagonal.
- Comparar los resultados experimentales con las diferentes formulaciones existentes para el cálculo de la fisuración diagonal.

4.3) DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.

Como ya hemos explicado anteriormente el proceso de carga de las vigas tiene unas fases de carga constante que corresponden a las diferentes combinaciones de cargas. Usaremos las fotografías correspondientes a esas fases de carga constante para analizar la fisuración diagonal. Con el programa en Matlab, desarrollado por L. Sánchez, procesaremos las fotografías y filtraremos la información para obtener una imagen en que se muestra el patrón de las fisuras. Una vez depuradas las imágenes el propio programa nos permite hacer un análisis de los patrones de fisuración para obtener distancia entre las fisuras, ancho medio de las fisuras y el ángulo de las mismas.

Una vez obtenida toda esta información podemos hacer una comparativa entre los diferentes elementos experimentales y comparar los resultados experimentales con las formulaciones detalladas en el estado del arte.

4.4) PATRÓN Y DISTRIBUCIÓN DE FISURAS.

Para obtener datos como: ángulos, separación diagonal ($S_{m\theta}$), separación horizontal (S_{mx}), separación vertical (S_{my}) y anchos de las fisuras (w), para la obtención de estos se emplea el criterio de medición establecido de acuerdo a la Figura 4-1.

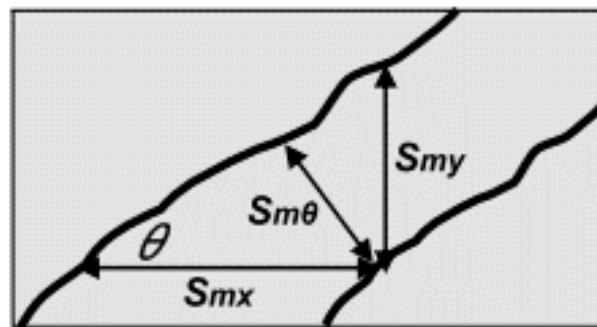


Figura 4-1. Parámetros obtenidos de las imágenes procesadas.

Para el análisis del patrón de fisuración se obtienen datos para posiciones de carga frecuente, característicos para los 4 ciclos y carga de plastificación como se muestra en la Figura 4-2. Analizamos los datos de separaciones medias y ángulos. Las vigas I122I y I122R no han podido ser analizadas por problemas con las fotografías y la viga I121R no tiene fotografías de todos sus ciclos.

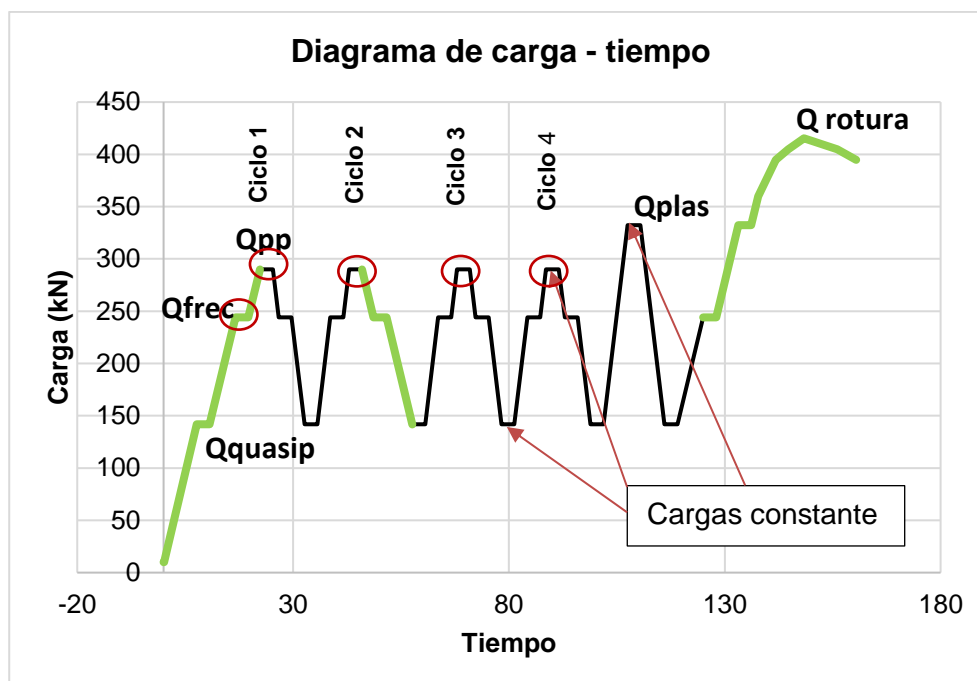


Figura 4-2. Carga vs tiempo puntos de análisis.

Como se puede apreciar en la Tabla 4-1, la Tabla 4-2 y la Tabla 4-3 la separación media casi no varía entre ciclos, pero lo hace de manera más significativa cuando comparamos la separación entre carga frecuente y el último ciclo. Esto indica que una vez las fisuras se generan, las cargas cíclicas solo harán aumentar ligeramente la longitud de las mismas, pero no harán aparecer más fisuras. En cambio, el aumento de la carga de frecuente a característica puede generar nuevas fisuras o alargar las existentes, de tal manera que la separación media disminuye.

Tabla 4-1. Separación diagonal media $Sm\theta$.

Viga	Resumen de Separación entre Fisuras (mm)						Variación	
	Qfrec.	Ciclo - 1	Ciclo - 2	Ciclo - 3	Ciclo - 4	Qplast.	C1 y C4	Qfre-C4
I121I	73.76	71.87	71.51	68.21	73.41	66.55	2.1%	-0.5%
I122I								
I123I	107.52	94.8	87.81	83.8	82.47	72.4	-13.0%	-23.3%
I124I	106.71	84.05	79.84	81.32	86.42	76.26	2.8%	-19.0%
I121R	63.53		60.16	61.72				
I122R								
I123R	79.4	71.88	68.18	67.56	67.41	62.29	-6.2%	-15.1%
I124R	88.63	73.38	84.92	83.62	70.77	61.35	-3.6%	-20.2%
I181I	74.31	73.46	72.92	75.84	73.47	70.73	0.0%	-1.1%
I182I	172.5	108.27	104.65	113.38	108.87	103.15	0.6%	-36.9%
I183I	114.22	97.43	105.36	105.74	101.29	79.77	4.0%	-11.3%
I184I	89.69	96.18	97.79	96.65	94.43	85.65	-1.8%	5.3%

Analizando los datos se puede apreciar que los valores medios de la separación diagonal media ($Sm\theta$) entre fisuras disminuyen significativa en la mayoría de las vigas entre la posición de carga frecuente y la carga característica (poco probable) del ciclo 4, esto ocurre también los valores medios en las separaciones verticales (Smy), valores medios de las separaciones horizontales (Smx), como se muestran en la Tabla 4-1,

Tabla 4-2 y Tabla 4-3. De igual manera se puede apreciar de los valores medios de separaciones para una carga característica del ciclo 4 en comparación con los valores medios del ciclo 1, se aprecia una variación.

Tabla 4-2. Separaciones Horizontales medias Smx.

Viga	Resumen de Separaciones Smx (mm)						Variación	
	Qfrec.	Ciclo - 1	Ciclo - 2	Ciclo - 3	Ciclo - 4	Qplast.	C1 y C4	Qfre-C4
I121I	154.74	145.79	131.94	125.92	127.37	126.55	-12.6%	-17.7%
I122I								
I123I	247.82	197.98	174.83	177.58	173.88	146.05	-12.2%	-29.8%
I124I	149.75	146.11	134.31	134.53	137.53	130.85	-5.9%	-8.2%
I121R	155.87		175.34	184.51				
I122R								
I123R	197.48	154.58	167.09	157.95	152.13	140.71	-1.6%	-23.0%
I124R	156.03	131.98	183.01	188.97	174.66	142.25	32.3%	11.9%
I181I	144.74	136.15	144.66	150.46	130.32	129.24	-4.3%	-10.0%
I182I	250.98	179.54	183.77	204.18	197.61	180.69	10.1%	-21.3%
I183I	225.94	209.6	179.47	203.65	188.53	152.19	-10.1%	-16.6%
I184I	182.73	188.04	178.98	183.29	177	164.87	-5.9%	-3.1%

Tabla 4-3. Separaciones verticales medias Smy.

Viga	Resumen de Separaciones Smy(mm)						Variación	
	Qfrec.	Ciclo - 1	Ciclo - 2	Ciclo - 3	Ciclo - 4	Qplast.	C1 y C4	Qfre-C4
I121I	75.04	76.63	75.05	75.01	75.86	68.94	-1.0%	1.1%
I122I								
I123I	117.11	110.07	97.5	94.15	94.13	82.09	-14.5%	-19.6%
I124I	99.5	84.97	78.19	79.43	82.77	78.69	-2.6%	-16.8%
I121R	65.12		64.45	67.31				
I122R								
I123R	82.13	75.49	74.89	74.07	73.44	69.36	-2.7%	-10.6%
I124R	97.43	74.05	91.83	88.36	75.09	64.82	1.4%	-22.9%
I181I	84.27	79.21	81.52	83.9	80.23	78.53	1.3%	-4.8%
I182I	135.28	107.47	92.06	99.46	97.93	98.44	-8.9%	-27.6%
I183I	95.51	88.73	106.07	111.5	110.32	84.28	24.3%	15.5%
I184I	96.36	92.13	82.87	84.31	80.17	82.22	-13.0%	-16.8%

Si analizamos con más detenimiento la viga I123I, podemos ver la variación entre la distancia entre ciclos es importante. La Figura 4-3 y la Figura 4-4 corresponden al ciclo 1 y 4 respectivamente. En ellas podemos ver que el patrón de fisuración es muy similar. Al revisar los datos del programa de Sánchez (Figura 4-5), se observa que en el primer ciclo no se han detectado todas las fisuras por ser demasiado finas.

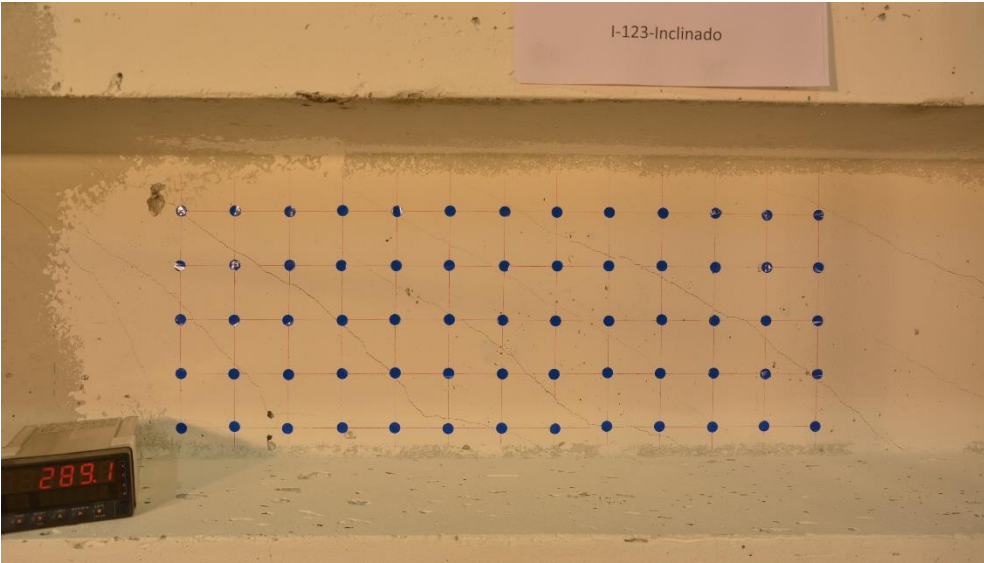


Figura 4-3. Fotografía viga I123I en el ciclo 1.

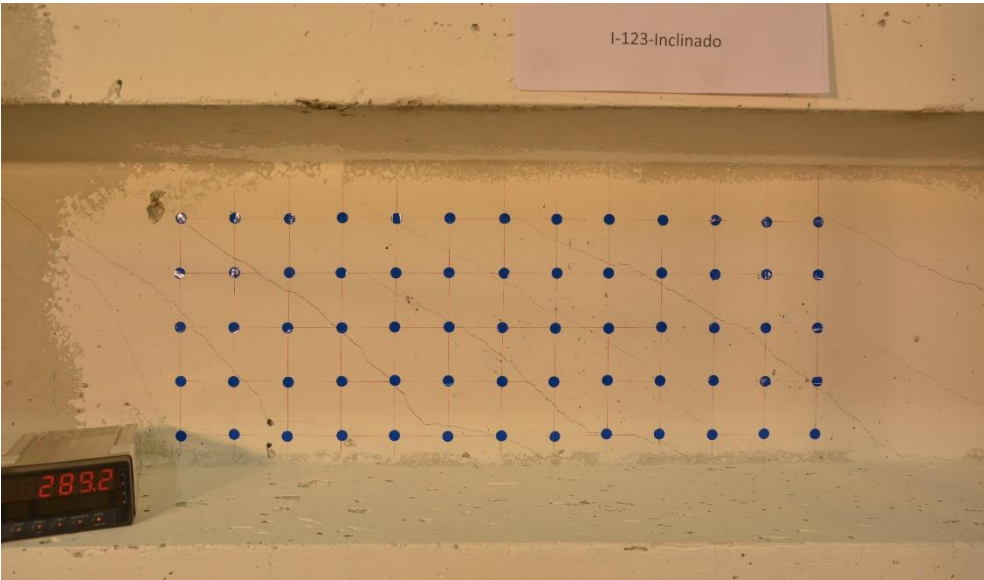
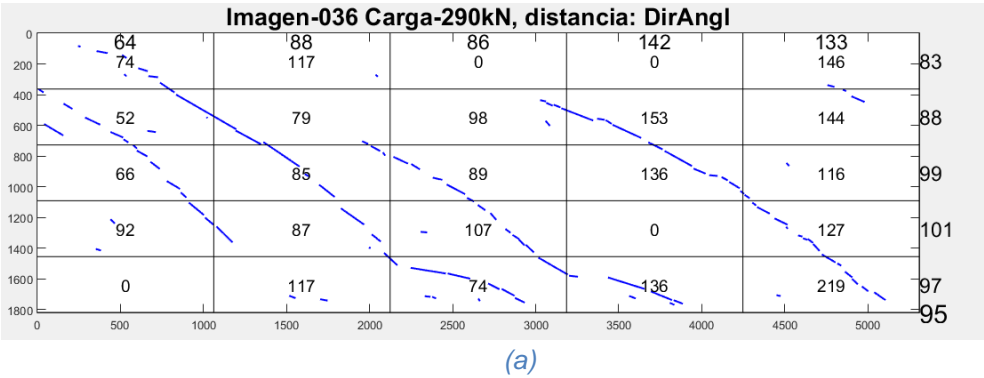


Figura 4-4. Fotografía viga I123I en el ciclo 4.



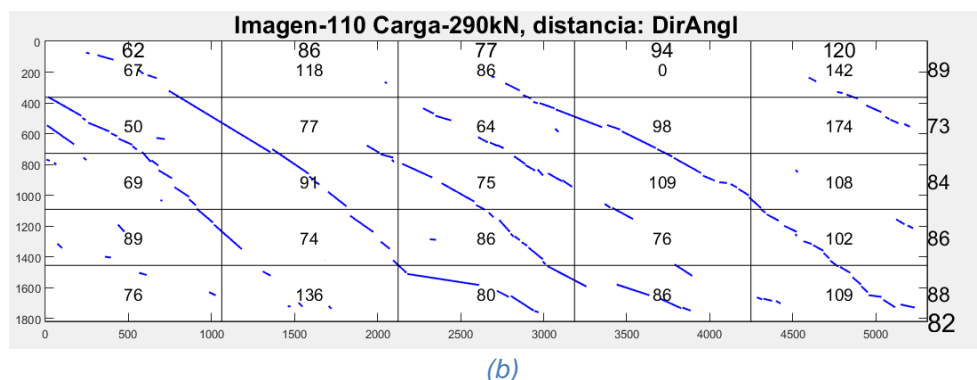


Figura 4-5. Patrón de fisuras de viga I123I, (a) ciclo 1y (b) ciclo 4

Teniendo en cuenta este hecho, si miramos los datos de la Tabla 4-1 para la viga I123I podemos ver como $Sm\theta$ va disminuyendo a medida que se suceden los ciclos de carga. Como la fisura se va haciendo cada vez más ancha, el programa es capaz de detectarla. Eso se refleja en una disminución de la separación entre fisuras desde el ciclo 1 al 4.

Comparando con los datos de la Tabla 4-1 de los valores medios de separaciones diagonales entre los 4 ciclos para la carga característica, se puede apreciar una variación pequeña entre cada ciclo de carga, además se cuenta con mayor cantidad de datos en los ciclos 2 y 3, por lo tanto, para los análisis se utilizará los datos del ciclo 3, considerando que se cuenta con mayor información y la variación de valores entre el ciclo 3 y 4 es mínima.

De acuerdo De Silva [13], el análisis y la toma de datos se realiza para las condiciones de carga a un 70% de la carga ultima, para las vigas en estudio es equivalente la situación de carga característica o poco probable.

En la Tabla 4-4, se muestra los resultados de separación diagonal entre fisuras para el ciclo 3, se puede apreciar que no se cuentan con datos para la viga I122I, I122R. Cabe indicar que se está usando los datos del ciclo 3 por contar la mayor cantidad de datos.

Tabla 4-4. Separación diagonal entre fisuras $Sm\theta$ para Q_{pp} en ciclo 3.

Viga	Separación entre Fisuras $Sm\theta$ (mm)					
	N° Datos	Media	Desviación Estándar	Mínima	Máxima	Ratio Sep. Máximo/Media
I121I	47085	68.21	35.53	16.49	223.78	3.28
I122I	-	-	-	-	-	-
I123I	22603	83.8	33.01	17.04	180.68	2.16
I124I	54636	81.32	48.13	18.94	218.54	2.69
I121R	32083	61.72	25.82	17.05	198.78	3.22
I122R	-	-	-	-	-	-
I123R	38108	67.56	19.58	16.03	147.44	2.18
I124R	24214	83.62	32.73	17.97	187.04	2.24
I181I	41232	75.84	28.82	18.05	199.7	2.63
I182I	25239	113.38	63.58	16.72	236.03	2.08
I183I	22887	105.74	59.68	16.99	251.7	2.38
I184I	34590	96.65	52.54	20.93	236.61	2.45

Tabla 4-5. Separación horizontal entre fisuras Smx para Qpp en ciclo 3.

Viga	Separación Horizontal entre Fisuras Smx (mm)					
	N° Datos	Media	Desviación Estándar	Mínima	Máxima	Ratio Sep. Máximo/Media
I121I	53952	125.92	69.38	15.91	443.14	3.52
I122I	-	-	-	-	-	-
I123I	26866	177.58	86.63	16.85	509.03	2.87
I124I	59819	134.53	98.6	15.69	567.18	4.22
I121R	36500	184.51	124.58	24.64	567.5	3.08
I122R	-	-	-	-	-	-
I123R	43389	157.95	68.87	14.02	473.56	3
I124R	31038	188.97	99.04	18.78	545.38	2.89
I181I	46963	150.46	70.88	16.67	338.51	2.25
I182I	36005	204.18	139.67	17.14	525.32	2.57
I183I	30068	203.65	102.64	22.25	449.55	2.21
I184I	36869	183.29	96.87	17.13	443.75	2.42

Tabla 4-6. Separación vertical entre fisuras Smy para Qpp ciclo 3.

Viga	Separación Vertical entre Fisuras Smy(mm)					
	N° Datos	Media	Desviación Estándar	Mínima	Máxima	Ratio Sep. Máximo/Media
I121I	45457	75.01	37.51	15.76	174.3	2.32
I122I	-	-	-	-	-	-
I123I	18524	94.15	37.95	16.54	188.81	2.01
I124I	51961	79.43	50.4	15.69	208.56	2.63
I121R	31083	67.31	27.44	15.95	118.2	1.76
I122R	-	-	-	-	-	-
I123R	34697	74.07	19.53	14.02	149.85	2.02
I124R	19789	88.36	37.92	15.73	158.96	1.8
I181I	39480	83.9	30.46	19.07	152.14	1.81
I182I	23719	99.46	71.52	16.49	232.75	2.34
I183I	21079	111.5	65.23	17.35	256.11	2.3
I184I	28862	84.31	45.15	19.28	257.45	3.05

Tabla 4-7. Ángulos medios para el ciclo 3.

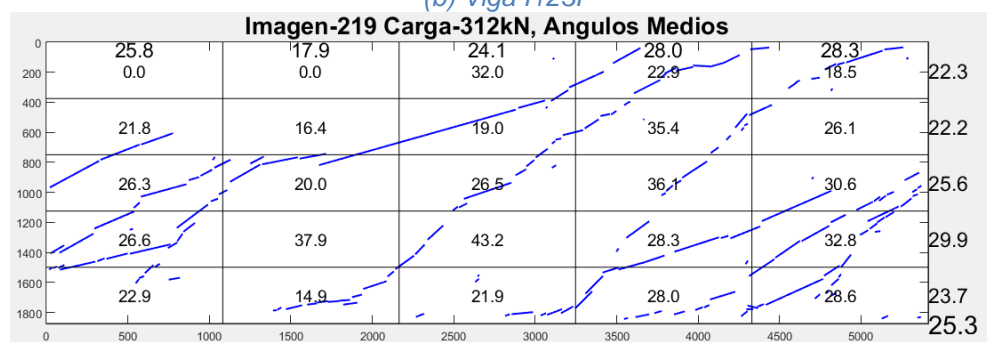
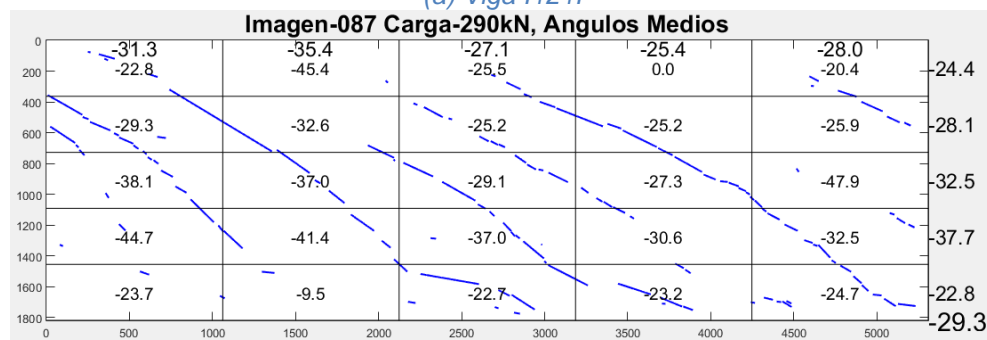
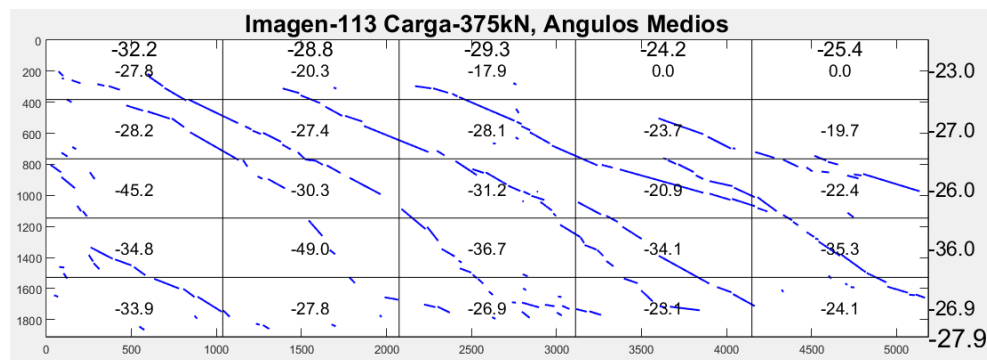
Viga	Ángulo de Fisuras (°)					
	N° Datos	Media	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Ratio Máxima/Media
I121I	31949	27.50	10.84	0.64	59.71	2.17
I122I	-	-	-	-	-	-
I123I	17078	29.26	10.5	5.79	59.85	2.05
I124I	39980	25.40	11.61	1.36	59.22	2.33
I121R	26554	24.61	6.37	7.06	55.53	2.26
I122R	-	-	-	-	-	-
I123R	27790	24.65	7.75	8.91	58.34	2.37
I124R	24838	28.01	9.02	5.39	51.86	1.85
I181I	32689	28.10	10.86	2.33	59.98	2.13
I182I	25030	27.51	13.29	0.76	67.05	2.44
I183I	21817	30.21	11.16	5.92	58.75	1.94
I184I	30564	28.07	9.17	4.08	58.05	2.07

En la Tabla 4-5, se muestran las separaciones diagonales ($Sm\theta$) entre fisuras, las vigas I182I e I183I, presentan valores medio mayor que las otras, por otra parte, las vigas I121R, tienen un valor promedio menor que las otras vigas. Las ratios máximo/media son de 2 a 3.3, siendo la viga I124I el que cuenta con la mayor ratio, es el que presenta mayor separación diagonal entre sus fisuras.

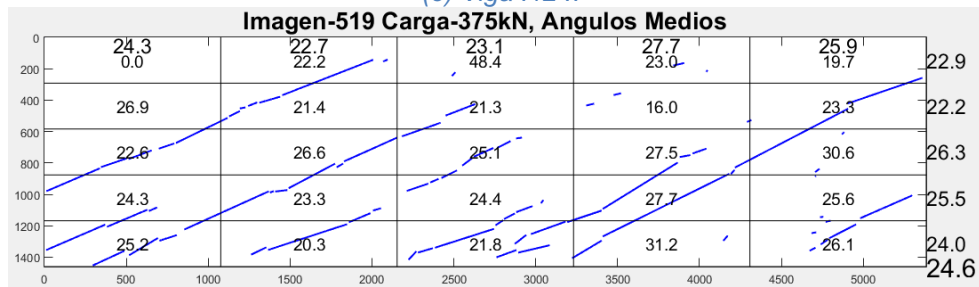
En la Tabla 4-6, se presentan los valores de las separaciones horizontales (Smx) entre fisuras, se puede apreciar que las vigas I182I e I183I, presenta los mayores valores, por otra parte, la viga que presenta menor valor es la I121I y el que presenta menor desviación estándar es la viga I123R, indica que presenta fisuras con mejor distribución.

La Tabla 4-7, muestra las separaciones verticales (Smy) entre fisuras la viga I182I e I183I presenta los mayores valores medios, la viga I123R muestra el menor valor medio. Las ratios máximo / media son 1.7 a 3. Siendo la viga I184I el que presenta la mayor ratio.

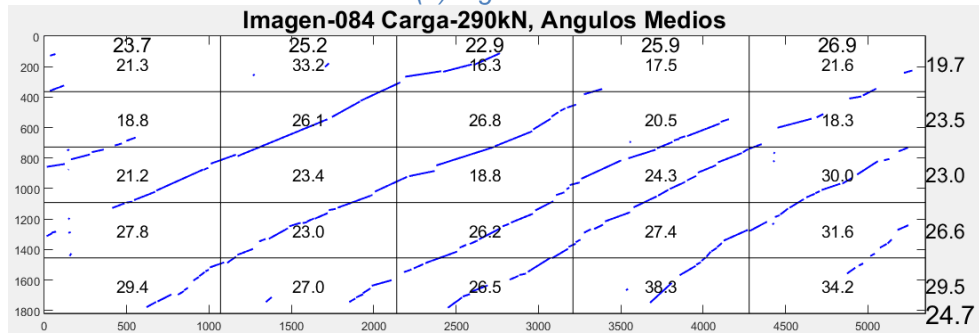
Se puede apreciar los ángulos medios se encuentran entre 24° y 30° , las vigas I121R e I123R, presentan los valores medio menores de 24.6° en promedio y la viga I183I presenta el mayor valor del ángulo medio, como se muestra en la Tabla 4-7.



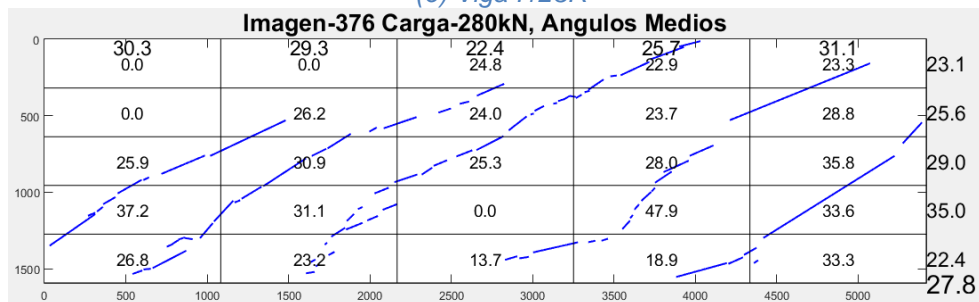
(c) Viga I124I



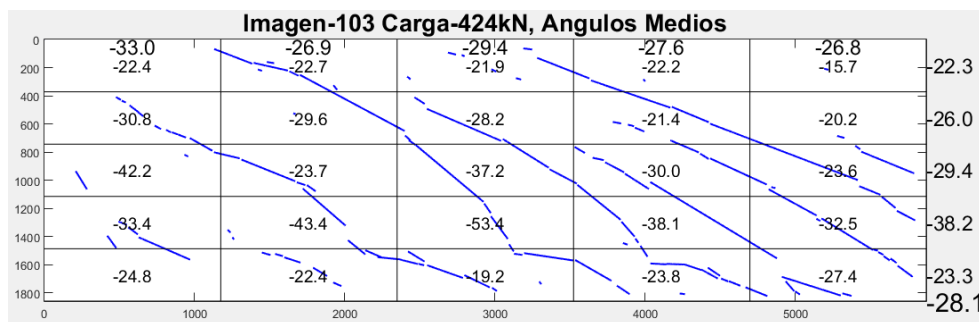
(d) Viga I121R



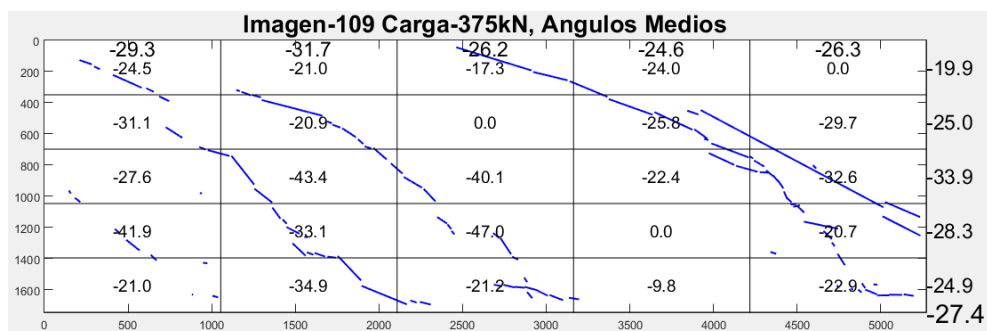
(e) Viga I123R



(f) Viga I124R



(g) Viga I181I



(h) Viga I182I

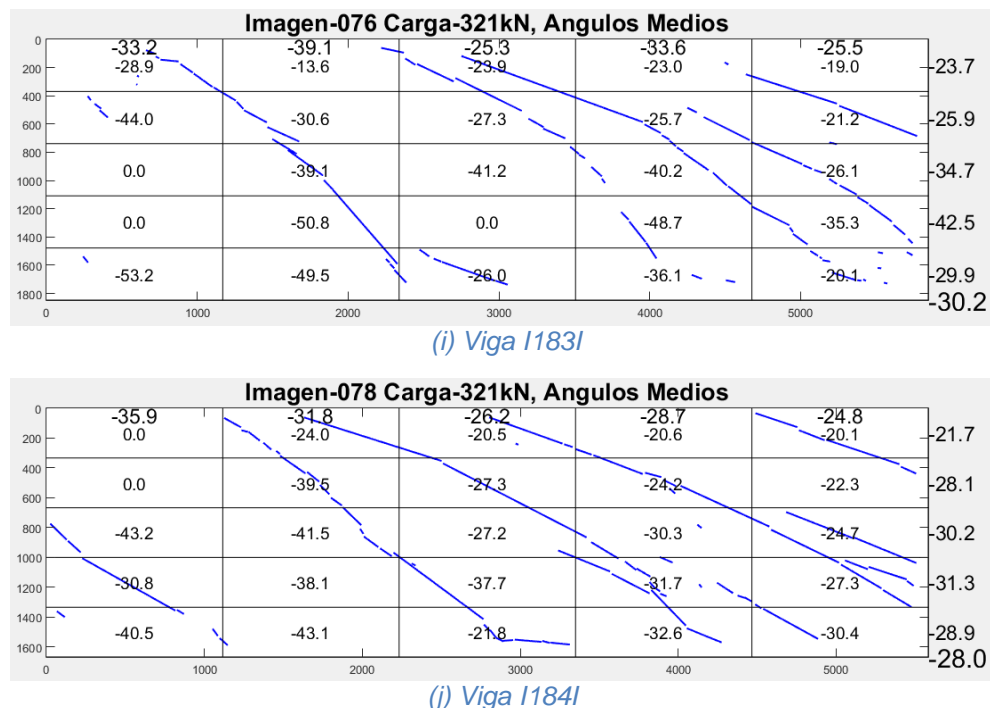


Figura 4-6. Patrón de fisuras en las Vigas.

Las vigas I121R y 123 R presentan distribución de fisuras casi paralelas como se muestra en la Figura 4-6(d), (e) y las fisuras son continuas no presentan saltos o cambios de dirección, la viga I182I presenta menor cantidad de fisuras por que presenta mayores valores de separación $Sm\theta$, Smx y Smy como se describió de los datos. La viga I121I, presenta más ruido en el patrón de fisuras esto debido a que las imágenes presentaban líneas de referencia, los cuales al momento de procesar se confundían con fisuras, sin embargo, es aceptable.

4.5) EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO EN LA SEPARACION ENTRE FISURAS Y ANGULO.

En la concepción de esta campaña se buscaba conocer cuáles eran los parámetros que controlaban la fisuración diagonal. Los parámetros que se pensaron como más relevantes eran el grado de pretensado, la armadura transversal y el ancho del alma. Como variables secundarias estaban la cuantía de refuerzo longitudinal en la zona de tracción y en el alma y el recubrimiento, los datos analizados son para la carga característica y corresponde al ciclo 3.

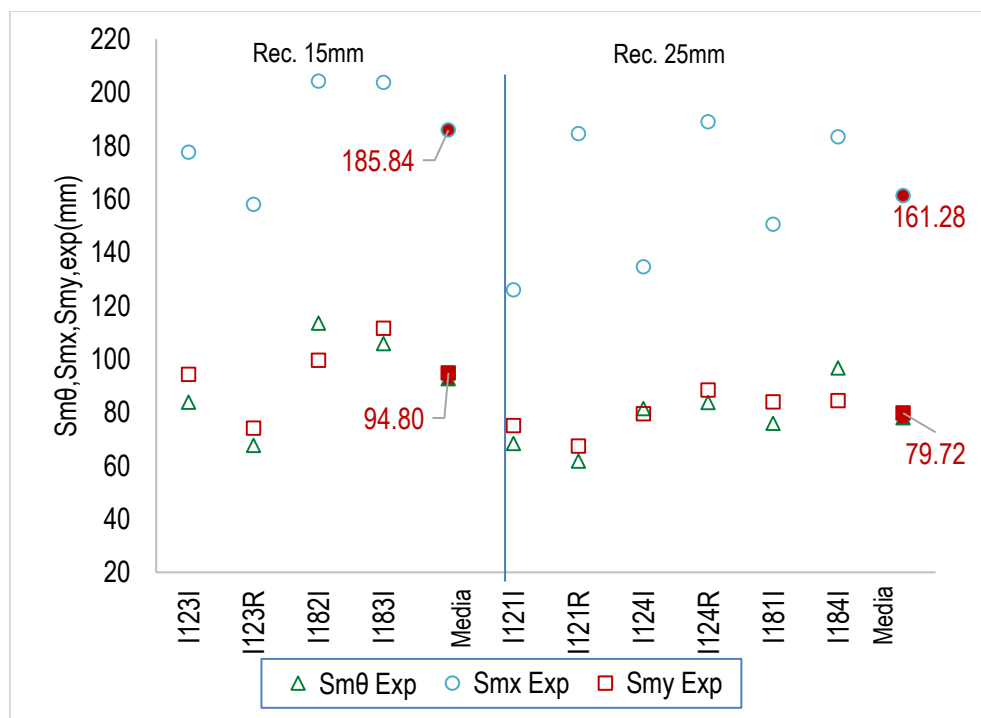
4.5.1) Recubrimiento de hormigón y ancho del alma.

Se plantearon los recubrimientos de 15 y 25 mm, en la Tabla 4-8. Se muestra los resultados de acuerdo al recubrimiento en el alma, analizando los datos se aprecia que los valores promedios de las vigas con recubrimiento de 15mm son mayores que de las vigas con recubrimiento de 25mm.

Tabla 4-8. Vigas agrupadas en función al recubrimiento.

Recubrimiento (mm)	Viga	Sm θ exp (mm)	Ángulos (θ)	Smx Exp (mm)	Smy Exp (mm)
15	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
15	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
15	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
15	I183I	105.74	30.21	203.65	111.5
Media		92.62	27.91	185.84	94.795
25	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
25	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
25	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
25	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
25	I181I	75.84	28.10	150.46	83.9
25	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		77.89	26.95	161.28	79.72

En la Figura 4-7, se muestra los valores medios de las separaciones entre fisuras (Sm θ , Smx y Smy), organizados de acuerdo al recubrimiento que llevan en el alma, se puede apreciar que las vigas con recubrimiento de 15mm presentan valores mayores que las vigas con recubrimiento de 25 mm, por lo tanto, se puede apreciar que existe una relación inversa entre estos dos valores.

Figura 4-7. Separaciones Sm θ , Smy y Smx, de acuerdo a recubrimientos en el alma.

En la Figura 4-8, se muestra la variación de los ángulos medios, se puede apreciar que el valor medio de las vigas con recubrimiento de 15mm es de 27.91° y para las vigas con recubrimiento de 25mm es de 26.95°, se puede indicar que existe una relación inversa, a menor recubrimiento se presenta mayores ángulos medios de separaciones

entre fisuras, sin embargo, no existe una variación significativa por lo que se puede indicar que no exististe una influencia significativa sobre los ángulos medios.

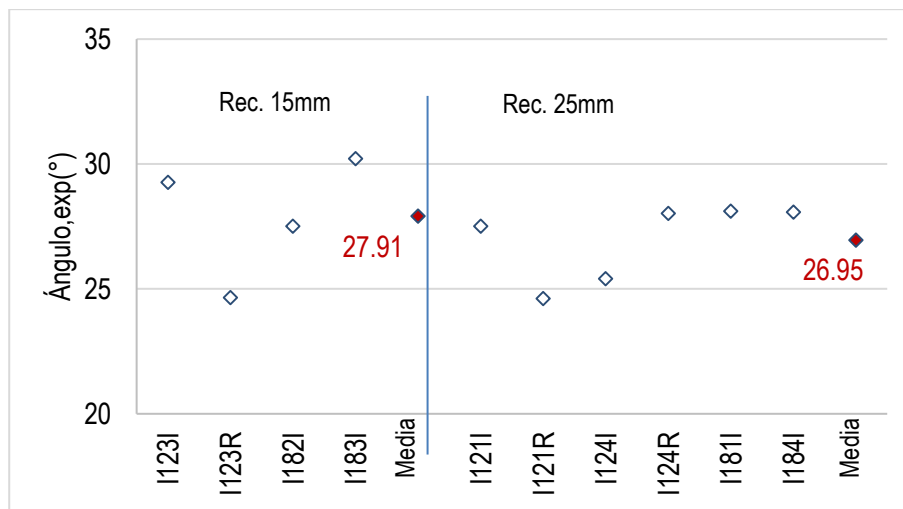


Figura 4-8. Ángulos medios de acuerdo a recubrimientos en el alma.

También se observa que las piezas con un recubrimiento menor tienen una dispersión de resultados mayor.

En la Tabla 4-9 se muestran los resultados ordenados de acuerdo al espesor de las almas, se puede apreciar que el grupo de vigas con almas de 120mm presentan unas separaciones menores que las vigas con almas de 180mm.

Tabla 4-9. Datos experimentales agrupada de acuerdo al espesor de alma.

Esp. Alma(mm)	Viga	Sm θ exp (mm)	Ángulos (θ)	Smx exp (mm)	Smy exp (mm)
120	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
120	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
120	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
120	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
120	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
120	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
Media		74.37	26.57	161.58	79.72
180	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
180	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
180	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
180	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		97.90	28.47	185.40	94.79

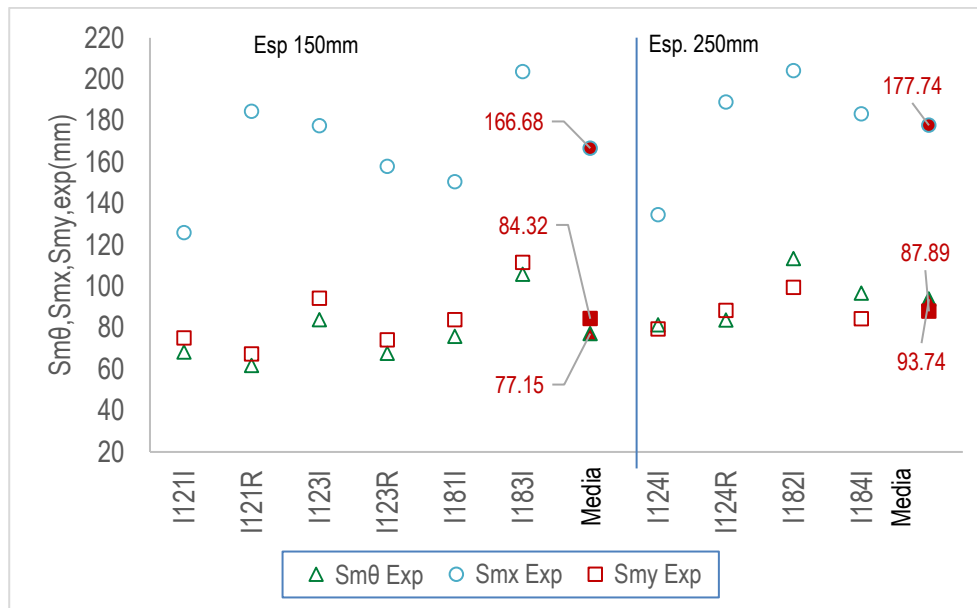


Figura 4-9. Separaciones de $Sm\theta$, Smy y Smx , de acuerdo al alma de las vigas.

La Figura 4-9, las separaciones medias se muestran de las vigas agrupadas de acuerdo al espesor de las almas, se aprecia que las vigas con espesor de alma de 120mm presentan un valor promedio menor en comparación de las vigas con espesor de alma 180mm. Por lo que se puede indicar que existe una influencia del espesor del alma

La Figura 4-10 muestra la distribución de los ángulos medios agrupados de acuerdo a los espesores de las almas, para el grupo de vigas con espesor de alma de 120mm el promedio de los ángulos es 26.57° y para el grupo de vigas con espesor de alma 180mm es de 28.47° , al igual que las separaciones existe una influencia del espesor del alma y ángulos medios.

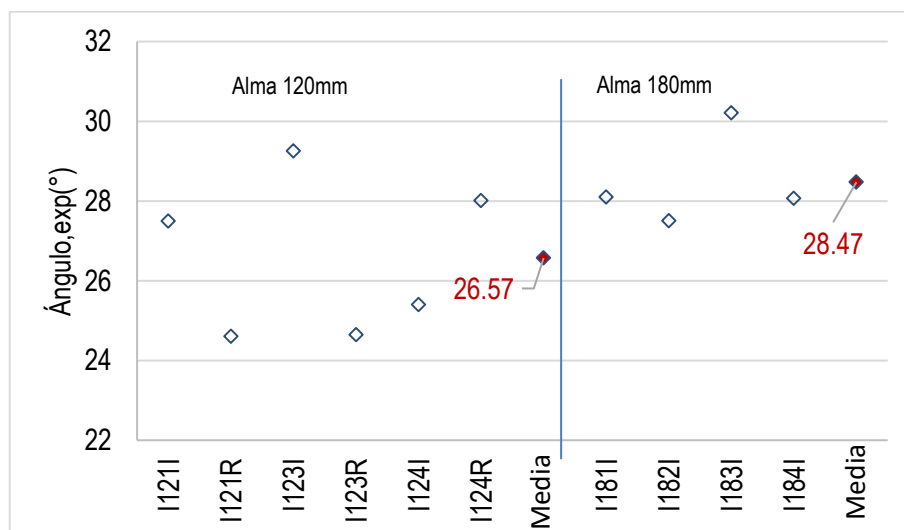


Figura 4-10. Ángulos medios de acuerdo al espesor de las almas

4.5.2) Grado de pretensado.

Si observamos la Tabla 4-10 podemos ver la distribución de separaciones en función del grado de compresión en el hormigón.

Tabla 4-10. Resumen de datos experimentales según el esfuerzo de compresión (σ_{cgp}).

σ_{cgp} (Mpa)	Viga	Sm θ exp(mm)	Ángulos (θ°)	Smx exp(mm)	Smy exp(mm)
2.50	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
2.50	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		101.20	29.14	193.47	97.91
2.82	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
2.82	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
2.82	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
2.82	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
Media		79.08	26.83	164.76	84.00
5.01	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
5.01	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
Media		94.61	27.81	177.32	91.68
5.63	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
5.63	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
Media		64.97	26.06	155.22	71.16

Podemos ver que hay una relación entre la tensión en el hormigón debido al pretensado y la separación entre fisuras: a mayor tensión menor separación. Aunque la viga I182I, viga con 4 tendones, tiene una separación mayor a la que le correspondería.

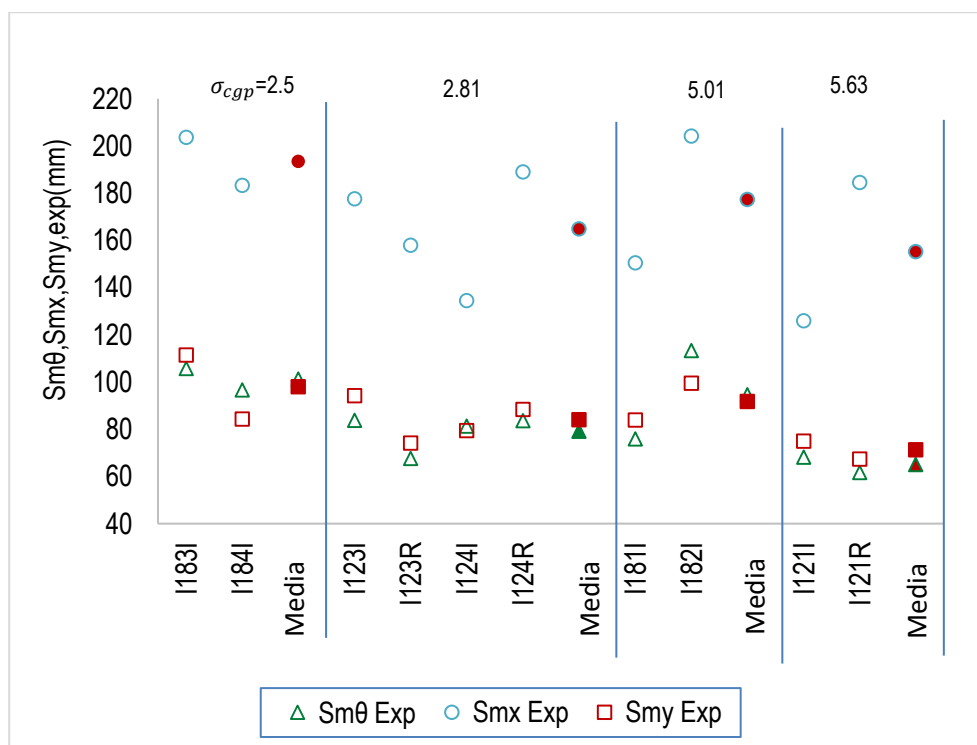


Figura 4-11. Separaciones Sm θ , Smx y Smy en función al esfuerzo de compresión del pretensado (σ_{cgp}).

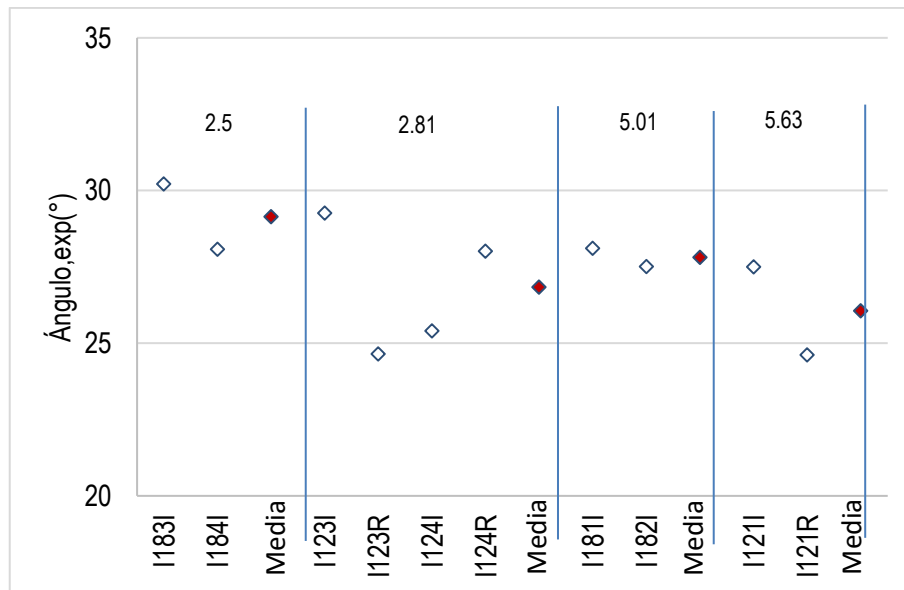


Figura 4-12. Ángulos medios de según esfuerzo de compresión de pretensado (σ_{cgp}).

En la Figura 4-12 se muestra el ángulo medio para cada una de las vigas agrupadas de acuerdo al esfuerzo de compresión, para un $\sigma_p = 2.5(Mp)$ se tiene un valor medio de 29.14° y $\sigma_p = 5.63(Mp)$ tiene un valor de 26.06 , el valor de los ángulos medios disminuye. se puede indicar que existe una tendencia que indica que, el nivel de pretensado influye en los ángulos medios.

En la Tabla 4-11 se separan los datos en función del trazado del cable y en la Figura 4-13, se aprecia que los valores medios de las separaciones diagonal ($Sm\theta$) y separaciones verticales (Smy) entre fisuras del grupo de vigas trazado inclinada de pretensado es mayor en comparación con las vigas con trazado de pretensado recto, sin embargo, las separaciones horizontales (Smx), son menores en las vigas con trazo inclina en comparación con las vigas de trazo recta.

Tabla 4-11. Resumen de datos experimentales de acuerdo a la disposición del pretensado.

Tipo	Viga	$Sm\theta,exp$ (mm)	Ángulos (θ°)	Smx,exp (mm)	Smy,exp (mm)
I	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
I	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
I	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
I	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
I	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
I	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
I	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		89.28	28.01	168.52	89.68
R	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
R	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
R	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
Media		70.97	25.76	177.14	76.58

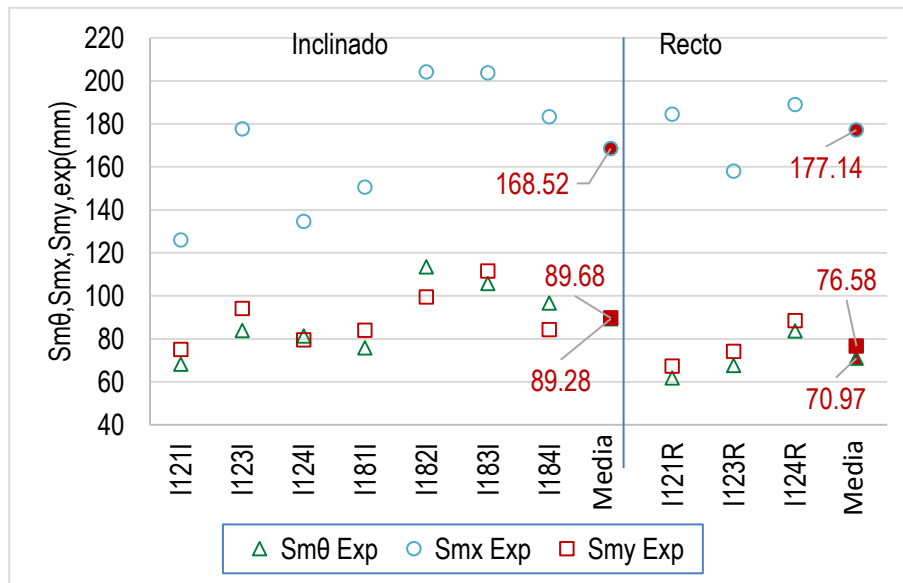


Figura 4-13. Separaciones, $Sm\theta$, Smx , Smy organizados de acuerdo a la disposición del pretensado.

En la figura 4-14, se muestra que los ángulos medios para las vigas con disposición de pretensado inclinado es de 28.01° y que para las vigas con disposición recta es 25.76° . Además, si comparamos específicamente las vigas iguales con trazado inclinado y recto podemos ver como el ángulo de las primeras es superior al de las de trazado recto. Eso es lo que hace que la Smx sea mayor

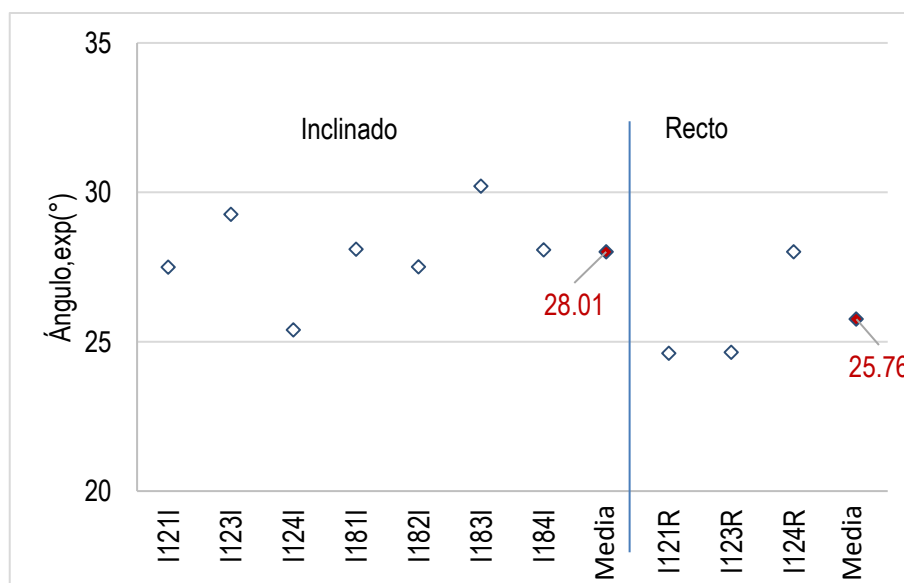


Figura 4-14. Ángulos medios organizados de acuerdo a la disposición del pretensado.

4.5.3) Efectos del espaciamiento de los estribos.

Al ordenar los resultados experimentales de acuerdo al espaciamiento de los cercos se puede apreciar que las vigas con separación de 150mm tienen un $Sm\theta$ de 77.14mm a un $Sm\theta$ de 93.74 de las vigas con separación de 250mm, ver tabla 4-12 y figura 4-14. Por otra parte, aun que el ángulo medio de las piezas con mayor cuantía de estribos es

muy variable la media de los ángulos de los dos tipos de vigas es muy similar ver figura 4-15.

Tabla 4-12. Valores agrupados de acuerdo espaciamento de los estribos.

Espa.	Viga	Sm θ ,exp (mm)	Ángulos (θ)	Smx,exp (mm)	Smy,exp (mm)
150	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
150	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
150	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
150	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
150	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
150	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
Media		77.14	27.39	166.68	84.32
250	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
250	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
250	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
250	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		93.74	27.25	177.74	87.89

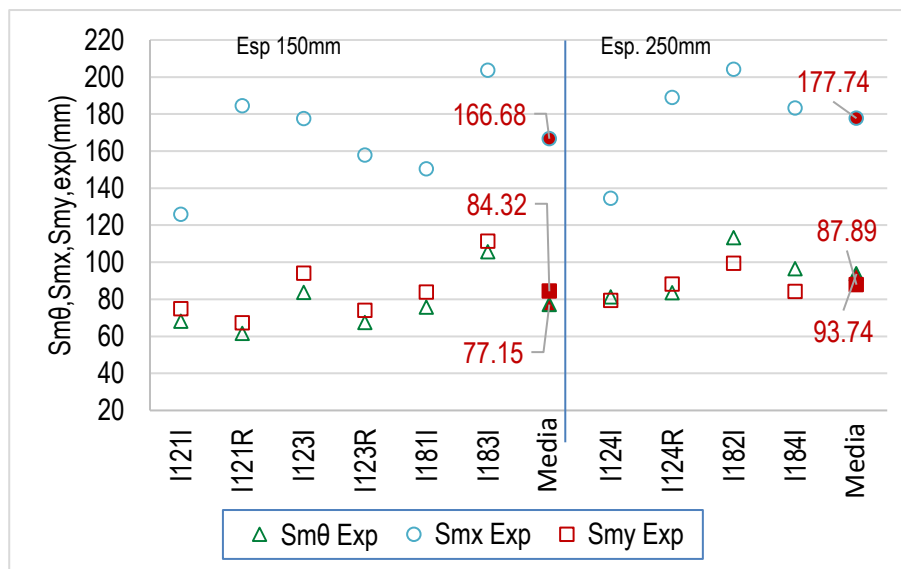


Figura 4-15. Separaciones organizadas de acuerdo a la separación de estribos.

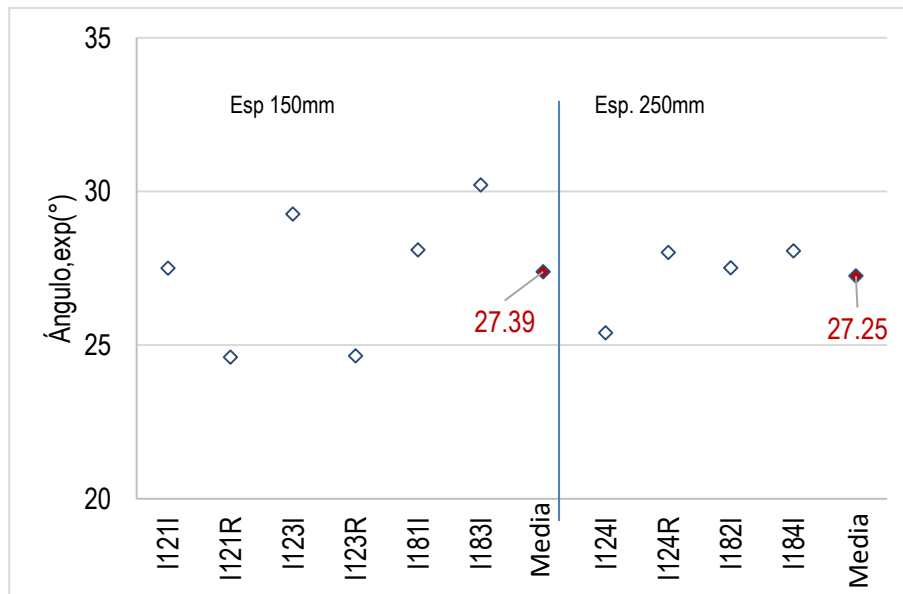


Figura 4-16. Ángulos de acuerdo al espaciamiento de los estribos.

4.5.4) Cuantía de refuerzo longitudinal.

Se puede apreciar en la figura 4-17 como un incremento en la cuantía del refuerzo longitudinal de acero hace disminuir los valores medios de las variables analizadas, sin embargo, las vigas I181I e I183I, no guardan relación, eso puede ser debido a los otros parámetros. Se puede concluir que existe una influencia pues a mayor cuantía de refuerzo longitudinal se aprecia la disminución de los valores medios de separaciones. Sin embargo, los valores de los ángulos medios no presentan demasiada variación ver figura 4-18.

Tabla 4-13. Valores agrupados de acuerdo a la cuantía de refuerzo longitudinal.

As. lon (mm ²)	Viga	Ángulos (θ)	Smθ,exp (mm)	Smx,Exp (mm)	Smy,exp (mm)
2.0%	I182I	27.51	113.38	204.18	99.46
2.0%	I184I	28.07	96.65	183.29	84.31
Media		27.79	105.02	193.74	91.89
2.2%	I121I	27.50	68.21	125.92	75.01
2.2%	I121R	24.61	61.72	184.51	67.31
2.2%	I123I	29.26	83.80	177.58	94.15
2.2%	I123R	24.65	67.56	157.95	74.07
Media		26.51	70.32	161.49	77.64
2.6%	I181I	28.10	75.84	150.46	83.90
2.6%	I183I	30.21	105.74	203.65	111.50
Media		29.16	90.79	177.06	97.70
2.9%	I124I	25.40	81.32	134.53	79.43
2.9%	I124R	28.01	83.62	188.97	88.36
Media		26.71	82.47	161.75	83.90

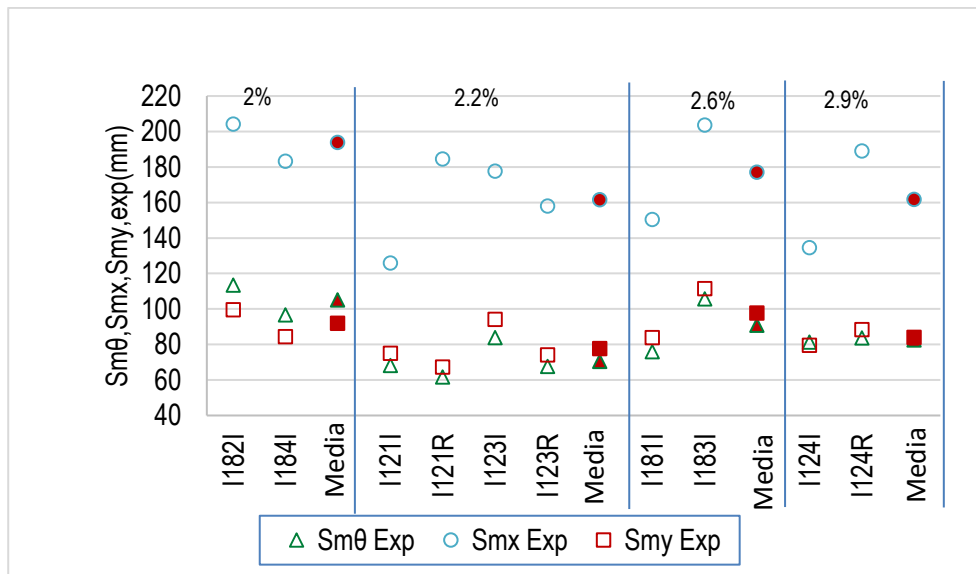


Figura 4-17. Separaciones vs cuantía de refuerzo longitudinal.

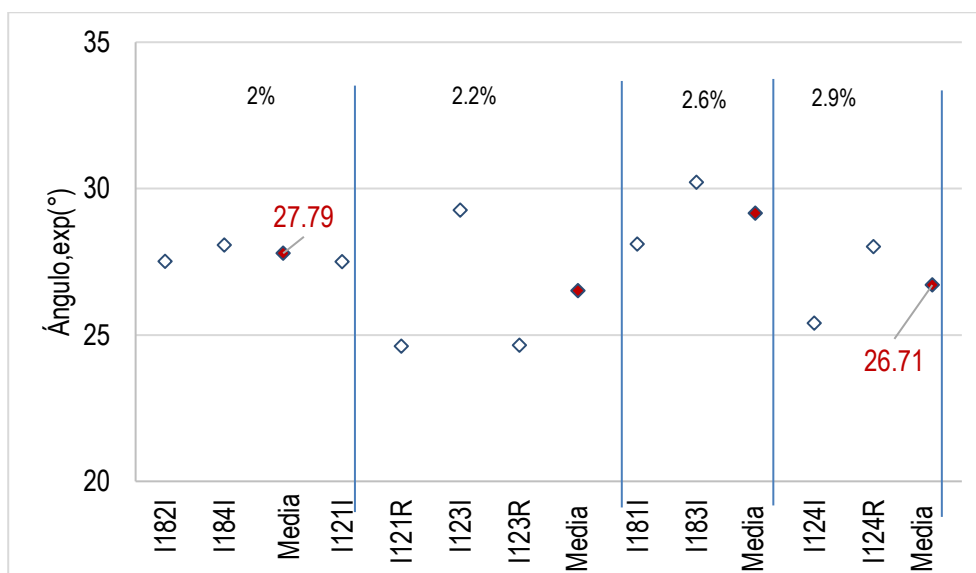


Figura 4-18. Ángulos vs cuantía de refuerzo longitudinal.

4.5.5) Efectos del espaciamiento del refuerzo secundario en alma.

No se puede apreciar un efecto directo sobre el comportamiento de las variables analizadas como se puede apreciar en la tabla 4-14 y figura 4-19.

Tabla 4-14. Valores agrupados de acuerdo a la cuantía de refuerzo en el alma.

N° Barras	AsxAlma	Viga	Sm θ ,exp (mm)	Ángulos (θ)	Smx,exp (mm)	Smy,exp (mm)
2	0.08%	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
2	0.08%	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
2	Media		64.97	26.06	155.22	71.16
2	0.11%	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
2	0.11%	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
	Media		101.20	29.14	193.47	97.91
6	0.23%	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
6	0.23%	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
6	0.23%	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
6	0.23%	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
	Media		79.08	26.83	164.76	84.00
6	0.34%	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
6	0.34%	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
6	Media		94.61	27.81	177.32	91.68

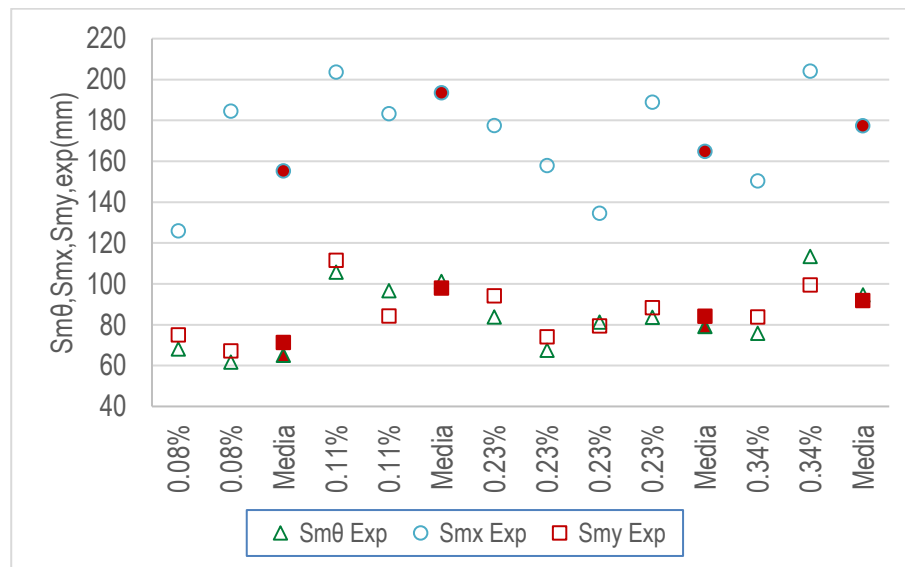


Figura 4-19. Separaciones vs cuantía de refuerzo en el alma

Tabla 4-15. Valores agrupados de acuerdo espaciamiento de los estribos.

Espa.	Viga	Sm θ Exp	Ángulos (θ)	Smx Exp	Smy Exp
150	I121I	68.21	27.50	125.92	75.01
150	I121R	61.72	24.61	184.51	67.31
150	I123I	83.80	29.26	177.58	94.15
150	I123R	67.56	24.65	157.95	74.07
150	I181I	75.84	28.10	150.46	83.90
150	I183I	105.74	30.21	203.65	111.50
Media		77.145	27.39	166.68	84.32
250	I124I	81.32	25.40	134.53	79.43
250	I124R	83.62	28.01	188.97	88.36
250	I182I	113.38	27.51	204.18	99.46
250	I184I	96.65	28.07	183.29	84.31
Media		93.7425	27.25	177.74	87.89

4.5.6) Resumen del comportamiento

Analizando las fotos hemos podido ver que las vigas I121R y I123R tienen un patrón de fisuración muy paralelo y equidistante, como si fueran paneles. El hecho de tener estribos cada 150 mm y una tensión de compresión constante debido al trazado recto ha facilitado este comportamiento. En el caso de la viga I124R, el efecto de fisuras paralelas se pierde un poco presumiblemente por la presencia de cercos más separados.

Otro dato que se ha podido observar es que, aunque la separación media de las fisuras se mantiene constante para piezas con diferentes densidades de estribos, las fisuras se concentran en ciertas zonas. De esta manera piezas con alta densidad tienen las fisuras separadas de forma más regular y en cambio las piezas poco armadas tienen las fisuras mucho más separadas.

Si analizamos la dispersión de datos de las piezas con mayor o menor densidad de estribos podemos ver que las piezas con una separación mayor tienen separaciones y ángulos más homogéneos en cambio hay una gran variación en las piezas de separación más pequeña.

Hemos podido observar como la presencia de pretensado ha hecho disminuir la separación de las fisuras. Pero ha resultado más efectiva la presencia de pretensado con un trazado recto excéntrico. El trazado inclinado, cruzando la zona central de la pieza no ha conseguido ni disminuir la separación ni hacer más horizontales las fisuras

4.6) ANCHO DE FISURAS.

En este apartado se analizan los anchos medios de las fisuras observadas experimentalmente para cada punto de carga. En la figura 4-20 se puede apreciar que, para el primer punto, correspondiente a la carga cuasi permanente del ensayo, no se cuenta con información debido a que no se han generado las fisuras o son demasiado pequeñas, por lo tanto, el programa no lo reconoce.

En la figura 4-20 se observa que la única viga en la que el ancho de fisura reproduce el efecto cíclico es la I123R, es decir, la apertura de la fisura incrementa al incrementar la carga y disminuye con las descargas. El resto de vigas ensayadas el ancho medio de las fisuras se mantiene constante con el nivel de carga de servicio, no pudiéndose observar un comportamiento que relacione los procesos de carga con la apertura de las fisuras.

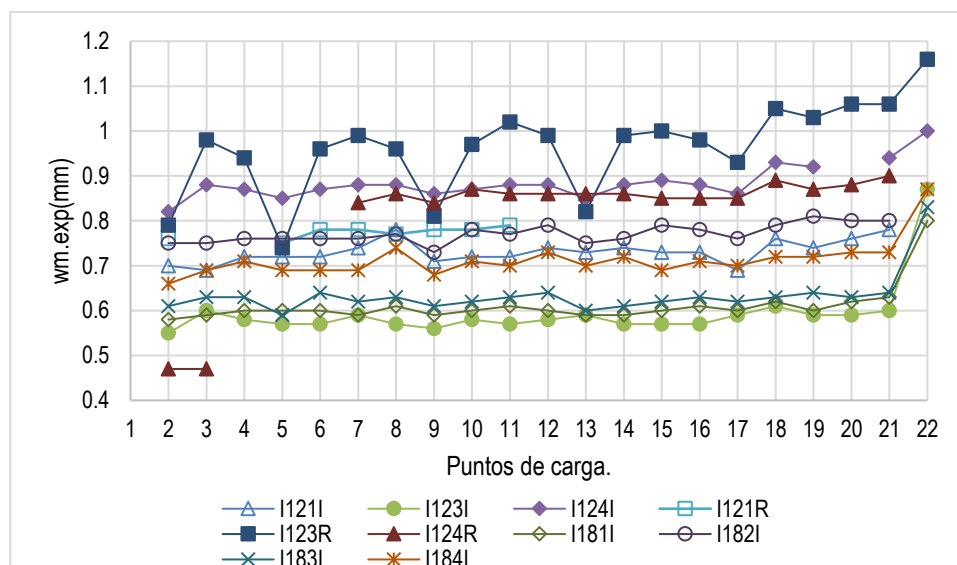


Figura 4-20. Variación de ancho medio de fisura vs nivel de carga.

Por otro lado, se puede apreciar en la figura 4-20, que la tendencia de los valores medios de los anchos de las fisuras se incrementa en todas las vigas cuando la carga se incrementa hasta rotura.

En la tabla 4-16, se muestra un resumen de la distribución de los anchos de las fisuras para la combinación de carga característica. Se puede apreciar que la variación del ancho de fisura entre el ciclo 1 y 4 se encuentra entre 0 y 5.9%, es decir la variación es muy pequeña. Sin embargo, la viga I124R presenta una variación muy grande cercana al 80%. Esta gran variación se debe a que las imágenes del ciclo 1 se procesaron a una escala diferente a las del ciclo 4.

La tabla 4-16 es un resumen de los diversos anchos medios de fisura registrados con el programa para las vigas analizadas experimentalmente. A raíz de un estudio detallado del valor medio de fisuras en función de las propiedades geométricas y de cuantías de armadura y niveles de pretensado de los diversos especímenes, se concluye que existe algún problema en la detección de apertura de las fisuras con el programa.

Tabla 4-16. Resumen de anchos medios (mm) para los puntos de análisis.

Viga	Resumen de anchos medios (mm)						Variación	
	Qfrec.	Ciclo - 1	Ciclo - 2	Ciclo - 3	Ciclo - 4	Qplast.	C1 y C4	Qfre-C4
I121I	0.7	0.69	0.74	0.72	0.73	0.76	5.80%	4.30%
I122I	-	-	-	-	-	-	-	-
I123I	0.55	0.6	0.59	0.57	0.57	0.61	-5.00%	3.60%
I124I	0.82	0.88	0.88	0.88	0.89	0.93	1.10%	8.50%
I121R	0.76	-	0.78	0.79	-	-	-	-
I122R	-	-	-	-	-	-	-	-
I123R	0.79	0.98	0.99	1.02	1	1.05	2.00%	26.60%
I124R	0.47	0.47	0.84	0.86	0.85	0.89	80.90%	80.90%
I181I	0.58	0.59	0.59	0.61	0.6	0.62	1.70%	3.40%
I182I	0.75	0.75	0.76	0.77	0.79	0.79	5.30%	5.30%
I183I	0.61	0.63	0.62	0.63	0.62	0.63	-1.60%	1.60%
I184I	0.66	0.69	0.69	0.7	0.69	0.72	0.00%	4.50%

A modo de ejemplo la figura 4.21 muestra la relación del ancho de fisuras medio entre bigas con diversos niveles de pretensado. Se observa como un incremento del nivel de pretensado no siempre supone la disminución del ancho medio de fisuras. Así mismo en la figura 4-22 se comparan los anchos medios en función de la cuantía de armadura longitudinal, no pudiéndose tampoco detectar una relación directa.

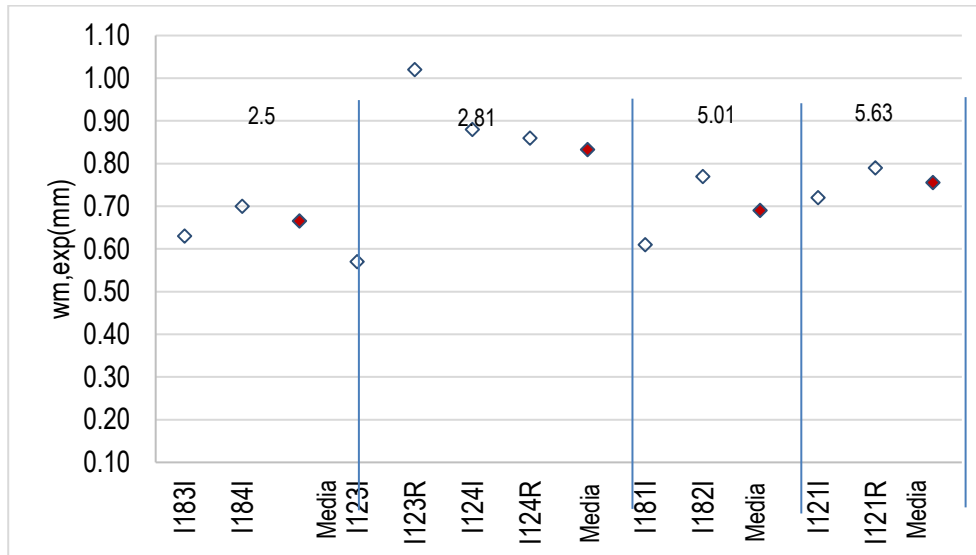


Figura 4-21. Anchos medios de acuerdo al nivel de pretensado.

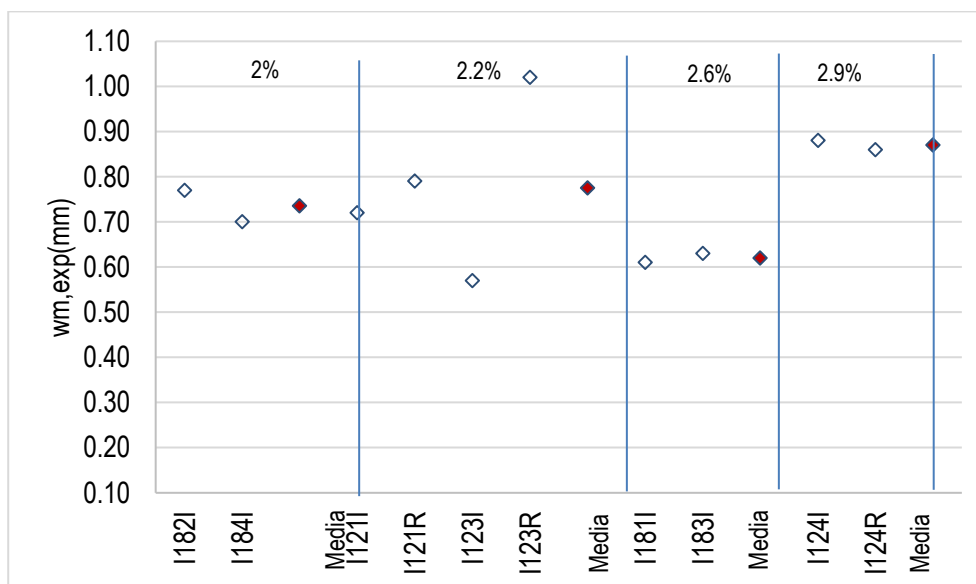


Figura 4-22. Ancho medio de acuerdo a la cuantía de refuerzo longitudinal.

Se ha analizado la falta de correlaciones directas entre los anchos medios y las diversas características de las vigas llegándose a la conclusión de que el programa de detección de imagen puede estar arrojando datos no reproducen la apertura real de las fisuras, debiendo revisarse el programa.

4.7) COMPARACIÓN DE VALORES TEORICOS Y EXPERIMENTALES.

En esta sección presentaremos las comparaciones, de las diferentes formulaciones teóricas para el cálculo separación horizontal media Sm_x , separación vertical media Sm_y , separación entre fisuras Sm_θ , con los resultados experimentales obtenidos de los del patrón de fisuras para cada viga. En dicho estudio se ha considerado como dato conocido el del ángulo (θ) observado experimentalmente para cada viga. Con este estudio se pretende analizar la validez de la expresión de Vecchio y Collins [17] para la separación media.

Adicionalmente se compran los ángulos (θ) de inclinación de las fisuras experimental con los planteados por diversas normativas y autores.

A raíz de los problemas detectados en la cuantificación del ancho medio de las fisuras (ver apartado 4.6) no se realiza la comparación de las formulaciones analíticas con los anchos de fisura experimentales, ya que los últimos deben ser recalculados tras revisar el algoritmo de cálculo de las imágenes.

4.7.1) Comparación de separaciones medias entre fisuras experimentales y calculados.

Se realizan los cálculos de acuerdo a las formulaciones indicadas en la sección 2.3 y se detalla el resumen en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17. Resumen de Separaciones diagonal de fisuras (Sm_θ) experimentales y calculadas (mm).

Viga	Sm_θ, exp (mm)	De Silva (mm)	Collins (mm)	Yoon (mm)	EC2 EN- 1992-1.
I121I	68.21	93.64	259.11	161.20	196.13
I122I	-	127.80	348.17	240.35	212.25
I123I	83.8	98.55	271.58	161.20	193.58
I124I	81.32	124.27	338.35	240.35	210.95
I121R	61.72	93.46	258.49	161.20	192.25
I122R	-	127.58	347.45	240.35	208.66
I123R	67.56	98.44	271.20	161.20	191.23
I124R	83.62	124.15	337.98	240.35	208.80
I181I	75.84	126.01	343.71	161.20	208.80
I182I	113.38	164.01	443.75	240.35	246.29
I183I	105.74	130.01	353.44	161.20	224.05
I184I	96.65	161.63	435.79	240.35	245.51

En la Tabla 4-17, en la primera columna se muestra los resultados experimentales de las separaciones diagonales (Sm_θ), y en las otras se muestran los valores calculados de las diferentes formulaciones, en base a estos datos se muestra la Figura 4-23, se aprecia que las formulaciones presentadas por EC2 y Collins se encuentran alejadas de los valores experimentales y las formulaciones presentadas por De Silva y Yoon presentan mejores ajustes, cabe indicar que la formulación desarrollada por De Silva presenta un mejor ajuste a comparación de las otras analizadas.

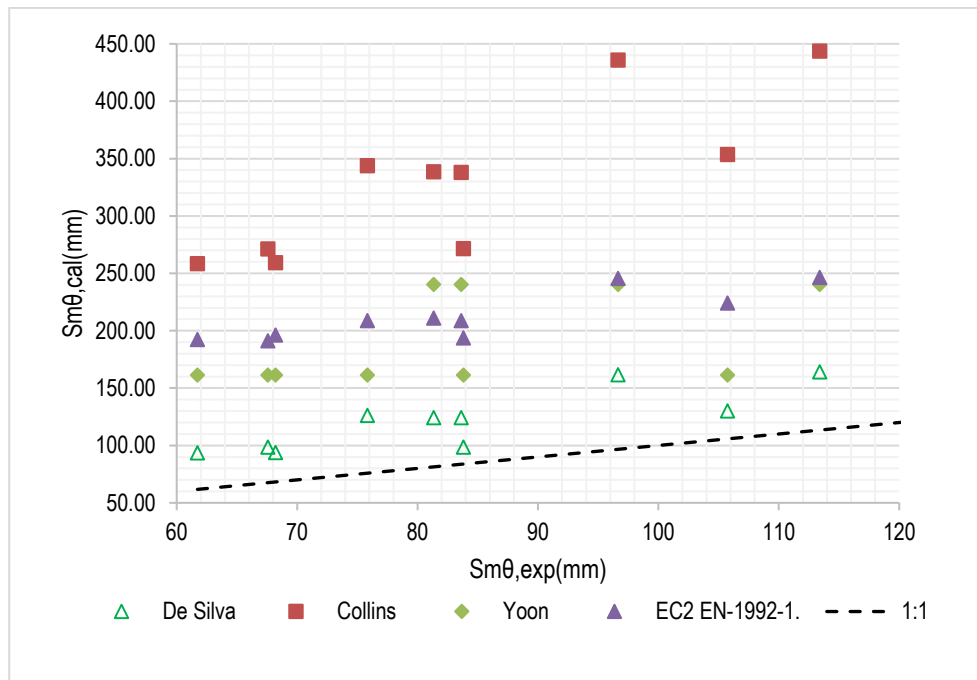


Figura 4-23. Comparación de Separaciones diagonal ($Sm\theta$) de fisuras experimentales y calculadas.

En la Tabla 4-18 se muestran las separaciones horizontales de las fisuras (Smx), en la primera columna se muestra los valores experimentales obtenidos para la combinación de carga característico que corresponde al ciclo 3, en la Figura 4-24 se muestra la comparación de los valores experimentales (Smx) y las obtenidas con las formulaciones. Las formulaciones de Yoon y Collins proporcionan resultados muy alejados mientras que las formulaciones según De Silva y el EC2 presenta ajustes más próximos a los experimentales.

Tabla 4-18. Resumen de separaciones horizontales de fisuras (Smx) experimentales y calculadas (mm)

Viga	Smx,exp (mm)	De Silva (mm)	Collins (mm)	Yoon (mm)	EC2 EN-1992-1.
I121I	125.92	176.72	449.69	456.00	154.92
I122I	-	171.37	433.04	456.00	143.39
I123I	177.58	177.18	447.00	456.00	151.76
I124I	134.53	171.86	431.99	456.00	142.20
I121R	184.51	175.48	445.98	456.00	150.13
I122R	-	170.60	430.82	456.00	140.13
I123R	157.95	176.44	444.98	456.00	148.89
I124R	188.97	171.41	430.81	456.00	140.26
I181I	150.46	172.69	436.60	456.00	144.96
I182I	204.18	178.19	453.88	456.00	155.99
I183I	203.65	174.04	437.52	456.00	160.10
I184I	183.29	178.97	451.64	456.00	155.37

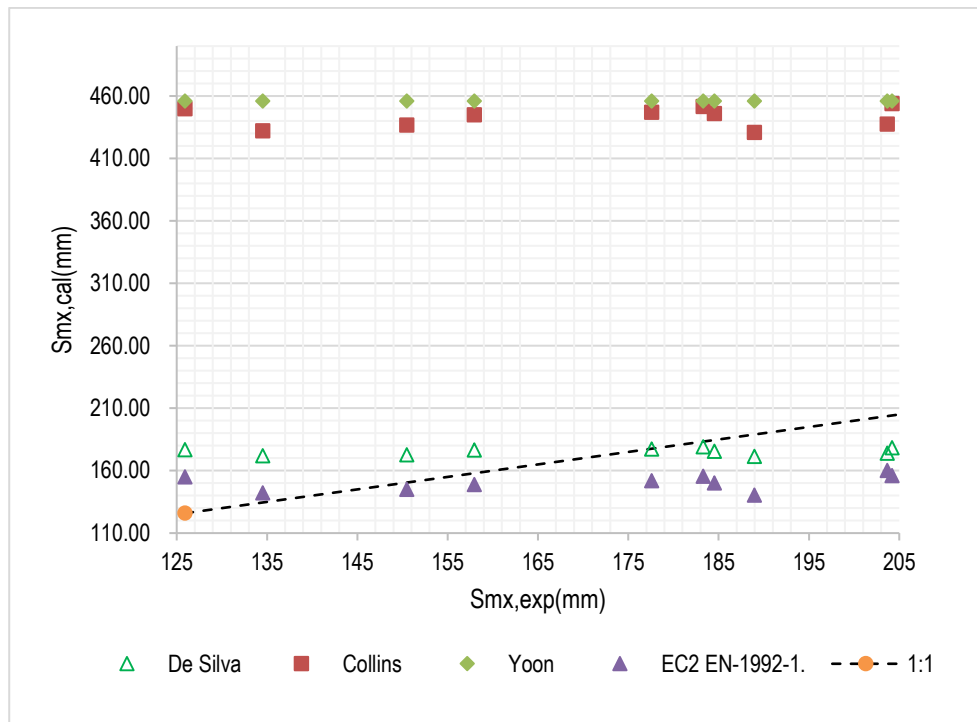


Figura 4-24. Comparación de separaciones horizontal (S_{mx}) de fisuras experimentales y calculadas.

En la Tabla 4-19 se muestra los resultados de las separaciones verticales entre fisuras, en la primera columna se muestra los valores experimentales obtenidos para las diferentes vigas, el cual corresponde a la posición de carga característica del ciclo 3, la Figura 4-25 muestra la correlación entre los valores experimentales y calculadas, las formulaciones del Collins y EC2, se alejan de los valores experimentales. La formulación según De Silva presenta un mejor ajuste.

Tabla 4-19. Resumen de separaciones verticales de fisuras (S_{my}) experimentales y calculadas.

Viga	$S_{my, exp}$ (mm)	De Silva (mm)	Collins (mm)	Yoon (mm)	EC2 EN-1992-1.
I121I	75.01	97.58	278.81	150.00	409.38
I122I	-	156.11	446.02	250.00	625.64
I123I	94.15	104.58	298.81	150.00	409.38
I124I	79.43	149.11	426.02	250.00	625.64
I121R	67.31	97.58	278.81	150.00	409.38
I122R	-	156.11	446.02	250.00	625.64
I123R	74.07	104.58	298.81	150.00	409.38
I124R	88.36	149.11	426.02	250.00	625.64
I181I	83.9	151.98	434.22	150.00	571.57
I182I	99.46	232.76	665.03	250.00	895.95
I183I	111.5	158.98	454.22	150.00	571.57
I184I	84.31	225.76	645.03	250.00	895.95

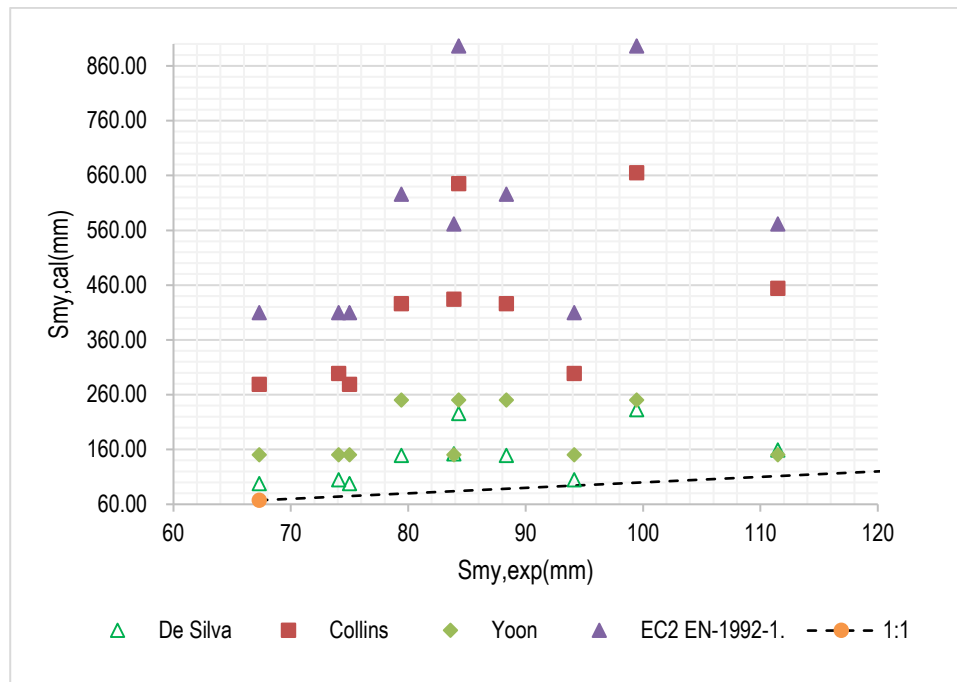


Figura 4-25. Comparación de separaciones verticales (S_{my}) de fisuras experimentales y calculadas.

Del análisis anterior podemos indicar que la formulación presentadas por De Silva muestra un mejor ajuste, por consiguiente, utilizando los resultados de esta formulación, para realizar un análisis más detallado con los datos para las combinaciones de carga frecuentes, característico y plastificación como se muestra en la Figura 4-26, Figura 4-27 y Figura 4-28.

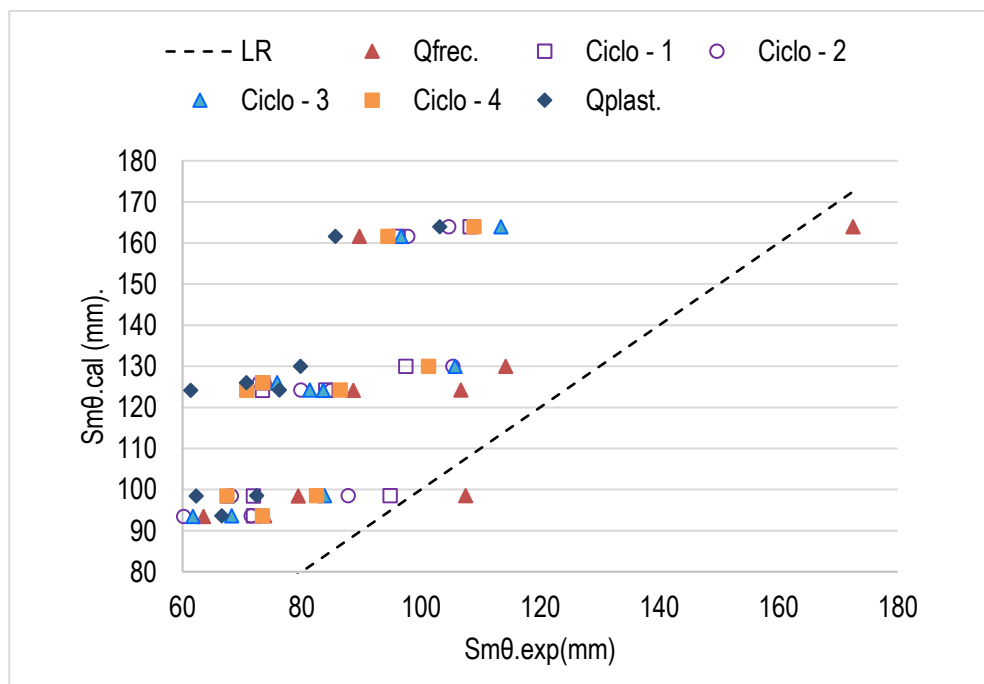


Figura 4-26. Comparación de separación $S_{m\theta}$, calculadas vs experimentales.

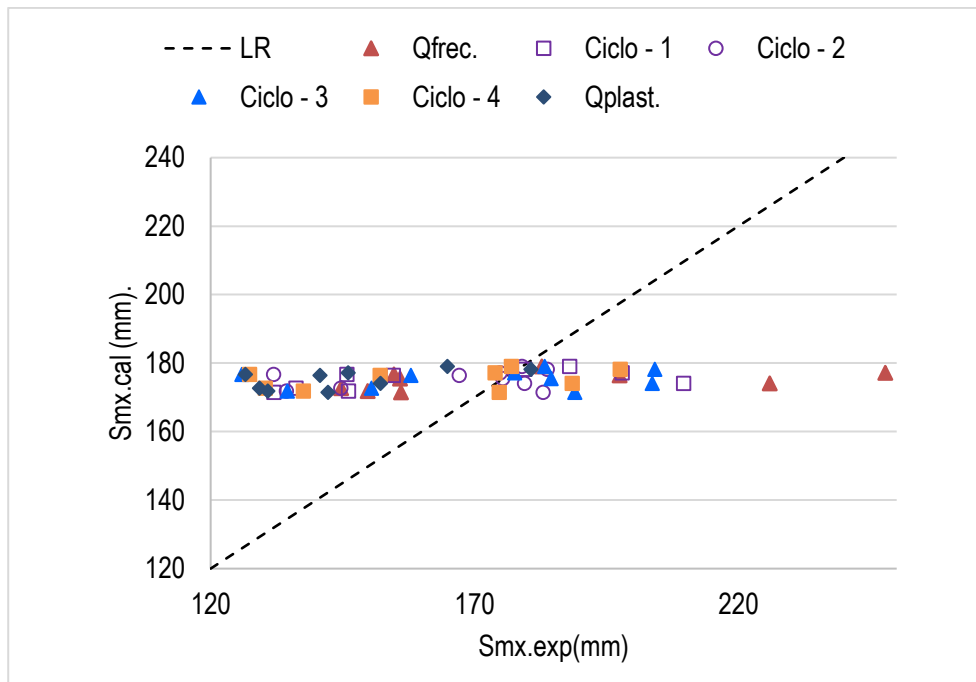


Figura 4-27 Comparación de separación S_{mx} , calculadas vs experimentales.

En la Figura 4-26, se aprecia que los datos para las separaciones diagonales, no presentan un ajuste adecuado con los datos calculados con la formulación propuesta por De Silva. En la mayoría de los casos son mayores que los obtenidos experimentalmente. En la Figura 4-27 se muestra la comparación de las separaciones horizontales S_{mx} analíticas con los datos experimentales, para diversas combinaciones de carga. Se observa que la predicción no es buena para un número elevado de vigas.

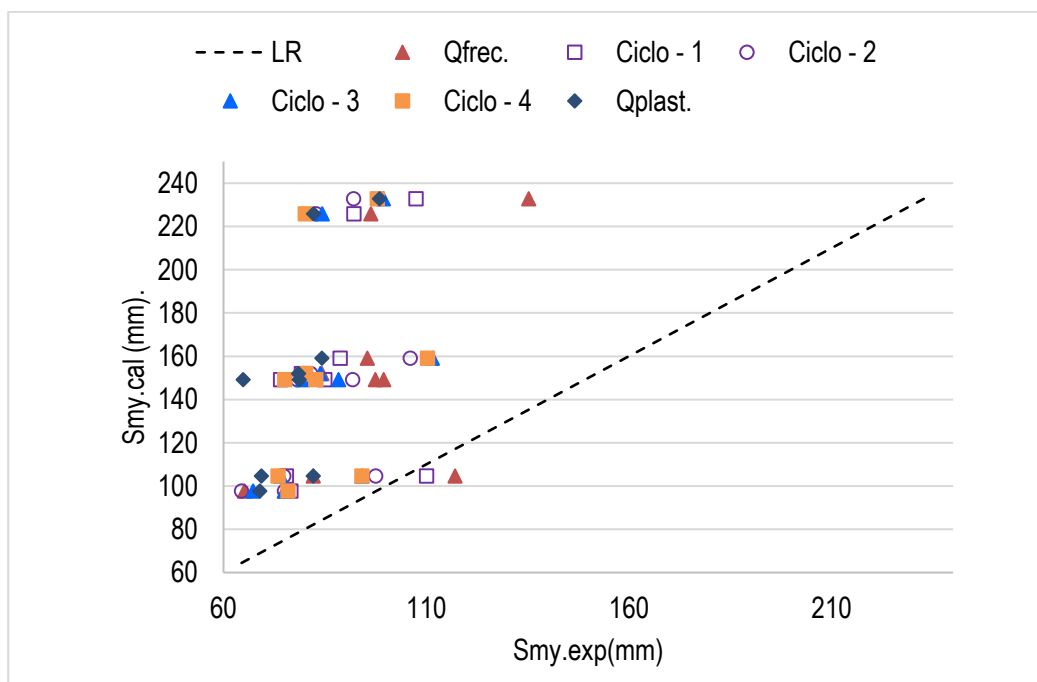


Figura 4-28 Comparación de separación S_{my} , calculadas vs experimentales.

En la Figura 4-28, se observa los datos de separaciones verticales (S_{my}) entre fisuras, los valores calculados son mayores para casi todos los casos.

A continuación, se realiza un estudio individual de cada una de las vigas con los datos de correspondiente a la combinación de carga característica (ciclo 3). La Tabla 4-20 muestra el resumen de dicho análisis.

Tabla 4-20. Resumen de separaciones experimentales y teóricas para la formulación. [13].

N°	Viga	Separación Horizontal entre fisuras S_{mx} (mm)		Separación Vertical entre fisuras S_{my} (mm)		Separación Media Calculada (mm)	
		Max. Separación de fisuras	Separación Media	Max. Separación de fisuras	Separación Media	S_{mx}	S_{my}
1	I121I	443.14	125.92	174.30	75.01	176.72	97.58
2	I122I	-	-	-	-	171.37	156.11
3	I123I	509.03	177.58	188.81	94.15	177.18	104.58
4	I124I	567.18	134.53	208.56	79.43	171.86	149.11
5	I121R	567.50	184.51	118.20	67.31	175.48	97.58
6	I122R	-	-	-	-	170.60	156.11
7	I123R	473.56	157.95	149.85	74.07	176.44	104.58
8	I124R	545.38	188.97	158.96	88.36	171.41	149.11
9	I181I	338.51	150.46	152.14	83.90	172.69	151.98
10	I182I	525.32	204.18	232.75	99.46	178.19	232.76
11	I183I	449.55	203.65	256.11	111.50	174.04	158.98
12	I184I	443.75	183.29	257.45	84.31	178.97	225.76

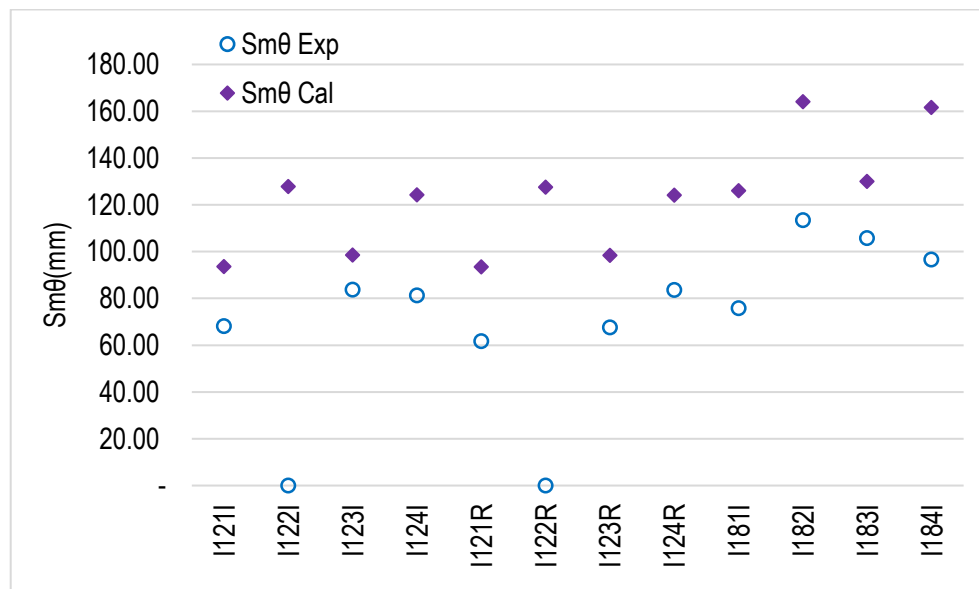


Figura 4-29. Comparación de separaciones calculada y experimental $S_{m\theta}$.

Como se puede observar en la Figura 4-29 la formulación devuelve para diferentes vigas el $S_{m\theta}$. En cambio, el valor experimental es claramente diferente. Esto se debe a que

la formulación no tiene en cuenta todos los parámetros que afectan al cálculo. Si analizamos las vigas I181I con los I183I podemos concluir que la variación de fuerza de pretensado no queda perfectamente recogida por la formula. Al comparar las dos puntas de la viga I124, también observamos una diferencia entre el valor experimental y el valor calculado, lo que también refleja que la formula no tiene en cuenta el trazado del cable.

Tabla 4-21. Ratio entre separaciones experimentales y teóricos para la formulación.
[13].

Nº	Viga	Ratio Cal/Exp		Separación diagonal entre fisuras (mm)		
		Ratio Smx	Ratio Smy	Sm θ Cal	Sm θ Exp	Ratio Cal/Exp
1	I121I	1.40	1.30	93.64	68.21	1.37
2	I122I	-	-	127.80	-	-
3	I123I	1.00	1.11	98.55	83.80	1.18
4	I124I	1.28	1.88	124.27	81.32	1.53
5	I121R	0.95	1.45	93.46	61.72	1.51
6	I122R	-	-	127.58	-	-
7	I123R	1.12	1.41	98.44	67.56	1.46
8	I124R	0.91	1.69	124.15	83.62	1.48
9	I181I	1.15	1.81	126.01	75.84	1.66
10	I182I	0.87	2.34	164.01	113.38	1.45
11	I183I	0.85	1.43	130.01	105.74	1.23
12	I184I	0.98	2.68	161.63	96.65	1.67

En la Tabla 4-21, se muestran el ratio de datos calculados de acuerdo a la formulación propuesta por De Silva y experimentales, se puede apreciar que los ratios Smx (Cal/Exp), están en el orden de la unidad con un máximo de 1.28, por otra parte los ratios Smy (Cal/Exp) son mayores que la unidad, por ejemplo las vigas I182I, I184I, presentan ratios de hasta 2.68. El mal ajuste de los Smy se refleja en los ratios Sm θ (Cal/Exp), que tampoco presentan correlación adecuada.

4.7.2) Comparación ángulos medios experimentales y calculados.

Adicionalmente se comparan en la Tabla 4-22 los ángulos de fisura experimentales con los valores de ángulo teta propuestos por diversas las formulaciones. En concreto se ha comprada con los valores obtenidos de acuerdo a las formulaciones de CEB-FIB (1996) y ASSTHO. Se puede apreciar que los valores de obtenidos con el CEB-FIB (1996), son mayores por ello presenten un peor ajuste mientras que los valores de la formulación de ASSTHO, presenta un mejor ajuste.

La formulación realizada por De Silva propone determinar el ángulo a partir de los valores analíticos de Smx y Smy (sección 2.3.5) [13], El ángulo obtenido no presenta un buen ajuste ya que como se ha visto en la Figura 4-28 los valores de Smy no se ajustan a los datos experimentales y por este motivo tampoco ajusta bien el ángulo obtenido a partir de ellos. En la Tabla 4-23, se puede también la relación de los valores cálculos y experimentales en el Figura 4-30.

Tabla 4-22. Correlación de ajuste de ángulos medios de fisura.

N°	Viga	f _{ck} (Mpa)	f' _{cm} (Mpa)	θ _{exp}	θ _{cal}		θ _{exp} /θ _{cal}	
					CEB-FIB (1996)	ASSHTO	CEB-FIB (1996)	ASSHTO
1	I121I	69.70	3.90	27.50	33.88	29.44	0.81	0.93
2	I122I	50.00	3.12	-	32.65	29.05	-	-
3	I123I	43.90	2.86	29.26	35.60	33.94	0.82	0.86
4	I124I	59.50	3.51	25.40	36.31	35.20	0.70	0.72
5	I121R	69.70	3.90	24.61	33.88	29.44	0.73	0.84
6	I122R	50.00	3.12	-	32.65	29.05	-	-
7	I123R	43.90	2.86	24.65	35.60	33.94	0.69	0.73
8	I124R	59.50	3.51	28.01	36.31	35.20	0.77	0.80
9	I181I	59.00	3.49	28.10	33.91	29.80	0.83	0.94
10	I182I	60.00	3.53	27.51	33.97	29.89	0.81	0.92
11	I183I	42.00	2.78	30.21	35.92	34.74	0.84	0.87
12	I184I	63.90	3.68	28.07	36.81	36.36	0.76	0.77

Tabla 4-23. Cálculo de ángulo propuesto De Silva.

N°	Viga	Separaciones Cal (mm)		Angulo de Fisura (°)			
		Smx	Smy	Smy/Smx	θ _{cal}	θ _{exp}	Ratio Cal/Exp
1	I121I	176.72	97.58	0.55	28.91	27.50	1.05
2	I122I	171.37	156.11	0.91	42.33	-	-
3	I123I	177.18	104.58	0.59	30.55	29.26	1.04
4	I124I	171.86	149.11	0.87	40.95	25.40	1.61
5	I121R	175.48	97.58	0.56	29.08	24.61	
6	I122R	170.60	156.11	0.92	42.46	-	-
7	I123R	176.44	104.58	0.59	30.66	24.65	1.24
8	I124R	171.41	149.11	0.87	41.02	28.01	-
9	I181I	172.69	151.98	0.88	41.35	28.10	1.47
10	I182I	178.19	232.76	1.31	52.56	27.51	1.91
11	I183I	174.04	158.98	0.91	42.41	30.21	1.40
12	I184I	178.97	225.76	1.26	51.59	28.07	1.84

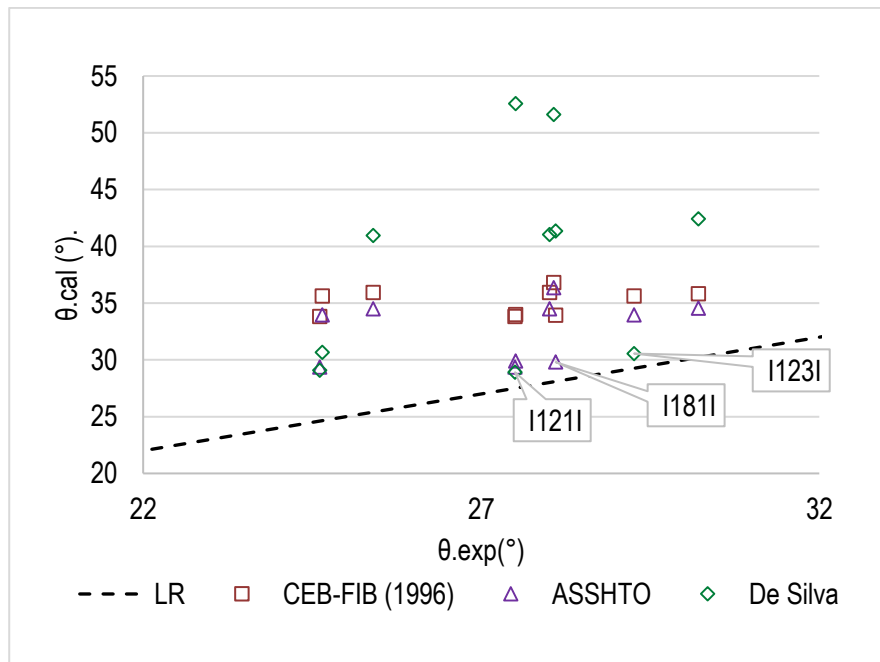


Figura 4-30. Correlación de ángulos calculados e experimentales.

En la Figura 4-30, se puede apreciar que los ángulos obtenidos a partir de la formulación de De Silva son en algunos casos mucho mayores, para la formulación realiza por De Silva las vigas I181I e I123I presentan un mejor ajuste de los ángulos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

Los complejos mapas de fisuración diagonal, así como las múltiples variables que condicionan el ancho de fisura, hacen que exista mucha dispersión de resultados entre las diversas formulaciones existentes de fisuración a cortante.

En este contexto, se ha analizado mediante fotogrametría los ensayos de una campaña experimental de vigas de hormigón parcialmente pretensado ensayadas a cortante. El programa de tratamiento de la imagen implementado está basado en la detección de bordes. Calculando la variación de intensidad local permite conocer la posición y anchura de las fisuras.

Las principales conclusiones que se extraen del uso de fotogrametría en el campo de la detección de patrones de fisuración son:

- A diferencia de otros sistemas de extensometría (bandas extensométricas, transductores en forma de roseta, etc.), el DIC es una herramienta muy potente que permite monitorizar una superficie (paño) considerable de viga o elemento en análisis, observando las posibles modificaciones de la separación media de las

CONCLUSIONES.

fisuras a lo largo de su trayectoria, así como la cuantificación de anchos de fisura y ángulos.

- Se monitorizan no sólo los posibles valores medios de la separación entre fisuras o bien del ancho de las fisuras, si no que el programa permite observar la generación de nuevas fisuras y descargas de las existentes.
- En la versión actual del programa empleado, se identificaron ciertos problemas relacionados con el cálculo de los anchos de las fisuras. En concreto, se han apreciado ciertas alteraciones en el registro de colores que hace que apenas exista variación entre los anchos de fisura bajo diferentes niveles de carga; de igual manera el cambio de escala de ciertas imágenes afecta notablemente a los valores obtenidos. Cabe indicar que el programa se encuentra en desarrollo.

Se ha estudiado cómo afecta el pretensado (grado de pretensado y trazado de los tendones), cuantía de armadura transversal, ancho del alma, cuantías de armado longitudinal y recubrimiento en el alma a la fisuración diagonal. Los tres parámetros estudiados son la separación media, el ángulo de las fisuras y el ancho de las fisuras. El ancho de fisura no se ha podido estudiar con el mismo detalle debido a un problema con el sistema de procesamiento de imágenes. De lo observado se puede concluir:

- El ángulo medio de las fisuras para las vigas en estudio se encuentra entre 24° y 30°.
- Las vigas I121R y I123R tienen un patrón de fisuración muy paralelo y equidistante, como si fueran paneles. El hecho de tener estribos cada 150 mm y una tensión de compresión constante debido al trazado recto, ha facilitado este comportamiento. En el caso de la viga I124R, el efecto de fisuras paralelas se pierde un poco, presumiblemente por la presencia de cercos más separados.
- El nivel de pretensado, así como su trazado influye en el patrón de fisuras. Un aumento del pretensado se traduce en un ángulo medio menor. Se observa también que en los tramos en el que el trazado es recto y excéntrico la inclinación de las fisuras es menor que en los tramos donde el trazo es inclinado.
- La armadura pasiva influye en la separación entre fisuras: a medida que se aumenta la cuantía la separación disminuye.
- El ángulo medio de las fisuras no varía con los ciclos de carga de servicio.
- Para niveles de cargas mayores, próximos a rotura, el ángulo puede variar e incluso pueden aparecer nuevas fisuras y, entre ellas, la crítica.
- Se observa cómo el estado tensional del cerco está fuertemente relacionado con el patrón de fisuración diagonal, es decir el comportamiento del cerco en servicio está condicionado al número de fisuras que lo cruzan.
- Las diferentes formulaciones existentes para calcular la separación entre fisuras de cortante necesitan del ángulo de inclinación de las mismas. Sin embargo, no vienen acompañadas de una formulación específica para calcular este último.
- Se estudiaron tres fórmulas distintas para calcular el ángulo de las fisuras, independientes de las formulaciones para la separación. En general, se observó que todas las formulas producen ángulos más verticales que los observados experimentalmente en la fase de servicio.
- En la literatura, la formulación propuesta por Vecchio y Bentz [23] para la separación media entre fisuras es la más utilizada, sin embargo se observó que ésta no proporciona un buen ajuste con los valores experimentales. En concreto

CONCLUSIONES.

existe una mala correlación para los valores de S_{my} . En general, las separaciones estimadas con este modelo son superiores a las observadas experimentalmente.

- La formulación presentada por De Silva [13] para la separación entre fisuras presenta mejor ajuste en comparación con las otras analizadas, si bien el valor medio tiende a ser sobreestimado. También se ha observado que no tiene en cuenta de manera adecuada la presencia de pretensado.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Complementar el análisis de ajuste de los anchos de fisura, considerando los nuevos datos obtenidos del programa desarrollado en Matlab.

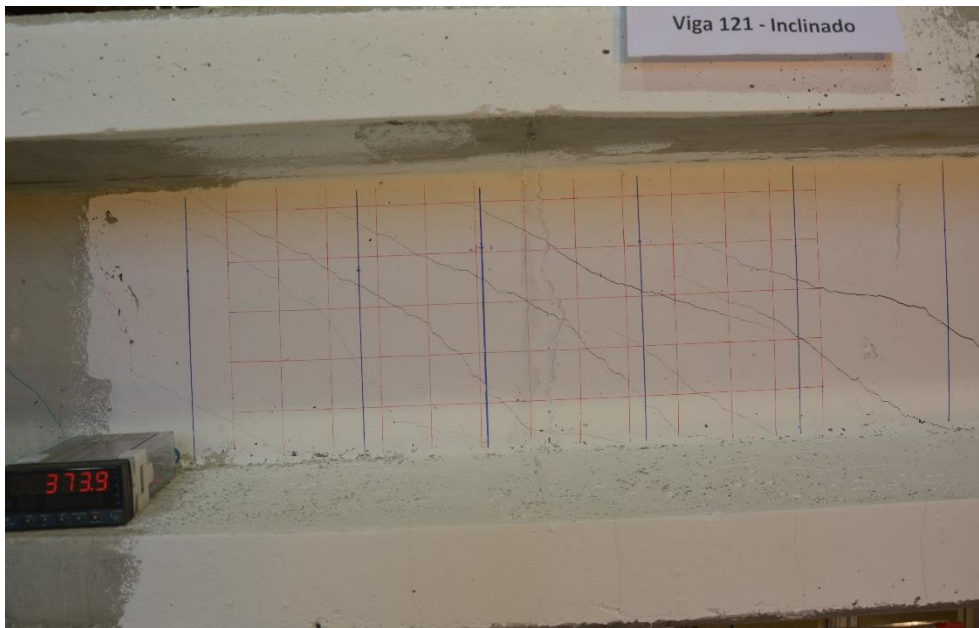
Mejorar el método de cálculo de anchos de fisura del programa y realizar una validación de los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

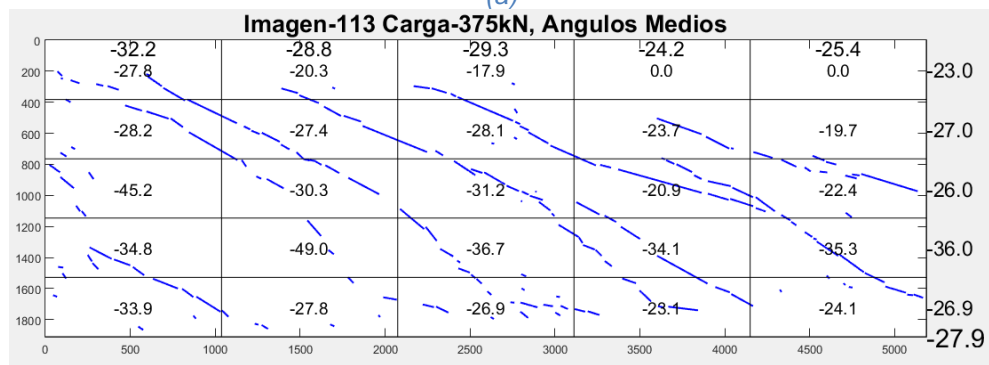
- [1] A. Páez, *El hormigón pretensado*, Primera Ed. Madrid, 1989.
- [2] A. E. Naaman, *Prestressed concrete analysis and design*, 2nd ed. Michigan: Techno Press 3000, 2004.
- [3] J. Murcia Vela, A. Aguado de Cea, and A. R. Marí Bernat, *Hormigon Armado y Pretensado II*. Barcelona: Servicio de Publicacion de la UPC, 1993.
- [4] Ministerio de Fomento, "EHE-08," vol. 1. pp. 1689–1699, 1999.
- [5] European Committe for standardization, "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings," vol. 2, no. 2005. 2011.
- [6] J. M. Bairán, A. R. Marí Bernat, and N. Duarte Gomez, "Direct optimal design of partially prestressed concrete for controlled cracking or fatigue," in *Concrete for a sustainable community, fib Symposium*, 2012, pp. 1–3.
- [7] J. M. Bairán Garcia, D. Santos Ferreira, N. Duarte Gomez, A. Marí Bernat, and U. Celada Blesa, "Control de la fisuración a cortante y flexión mediante pretensado parcial," in *VI Congreso de ACHE*, 2014, pp. 1–10.
- [8] A. Carpinteri, J. R. Carmona, and G. Ventura, "Propagation of flexural and shear cracks through reinforced concrete beams by the bridged crack model," *Mag. Concr. Res.*, vol. 59, no. 10, pp. 743–756, 2007.
- [9] H. M. Hassan, S. A. Farghaly, and T. Ueda, "Displacements at shear crack in beams with shear reinforcement under static and fatigue loadings.," *Proc. JSCE*, vol. 15, no. 433, pp. 215–222, 1991.
- [10] S. Piyamahant, "Shear behavior of reinforced concrete beams with a small amount of web reinforcement," vol. 25, no. January, pp. 2–7, 2002.
- [11] K. N. Rahal, "Shear Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Variable Thickness of Concrete Side Cover," *ACI Struct. J.*, vol. 18, no. 103, pp. 171–177, 2007.
- [12] M. Zakaria, T. Ueda, Z. Wu, and L. Meng, "Experimental Investigation on Shear Cracking Behavior in Reinforced Concrete Beams with Shear Reinforcement," *Adv. Concr. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 79–96, 2009.
- [13] S. De Silva, "Shear cracking behavior and its design methodology for prestressed reinforced concrete beams," Saitama University, 2008.
- [14] E. Witchukreangkrai, H. Mutsuyoshi, M. Takag, and S. De Silva, "Evaluation of Shear Crack Width in Partially Prestressed Concrete Members," *Proc. JCI*, vol. 28, no. 1, pp. 823–828, 2006.
- [15] E. Witchukreangkrai, H. Mutsuyoshi, K. Mareki, and T. Oshiro, "Control of Diagonal Cracking in Partially Prestressed Concrete Beams," *Proc. JCI*, vol. 26, pp. 727–732, 2004.
- [16] M. Zakaria, T. Ueda, and Z. Wu, "Evaluating and Proposing Prediction Models of Shear Crack Width in Con- Corete Beams," *Japan Soc. Civ. Eng.*, vol. 67, no. 2, pp. 245–263, 2011.

-
- [17] F. J. Vecchio and M. P. Collins, "The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear," *ACI Journal Proceedings*, vol. 83, no. 2. pp. 219–231, 1986.
- [18] Transport Research Board Executive Committee, *Simplified Shear Design of Prestressed Concrete Members*, vol. 7, no. 2. Washington, D.C.: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2005.
- [19] W. Burger and M. J. Burge, *Digital Image Processing*, Second. Verlag London: Springer, 2016.
- [20] W. Benning, J. Lange, R. Schwermann, C. Effkemann, and S. Görtz, "Monitoring Crack Origin and Evolution At Concrete Elements Using Photogrammetry," *XXth Congr. ISPRS (International Soc. Photogramm. Remote Sensing)*, vol. 12, p. 23, 2004.
- [21] W. Zhang, Z. Zhang, D. Qi, and Y. Liu, "Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, pp. 19307–19328, 2014.
- [22] L. Sánchez and J. M. Bairán Garcia, "Crack detection in concrete elements from RGB pictures using modified line detection kernels," 2016.
- [23] E. C. Bentz, F. J. Vecchio, and M. P. Collins, "Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements," *ACI Struct. J.*, vol. 103, no. 4, pp. 614–624, 2006.

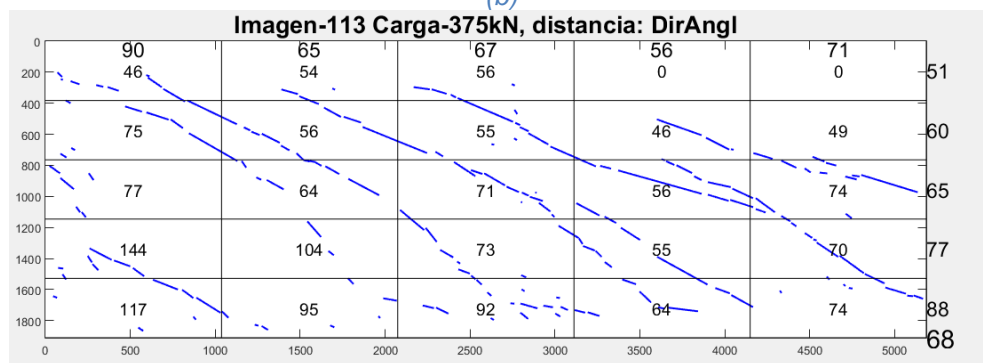
ANEXO



(a)



(b)



(c)

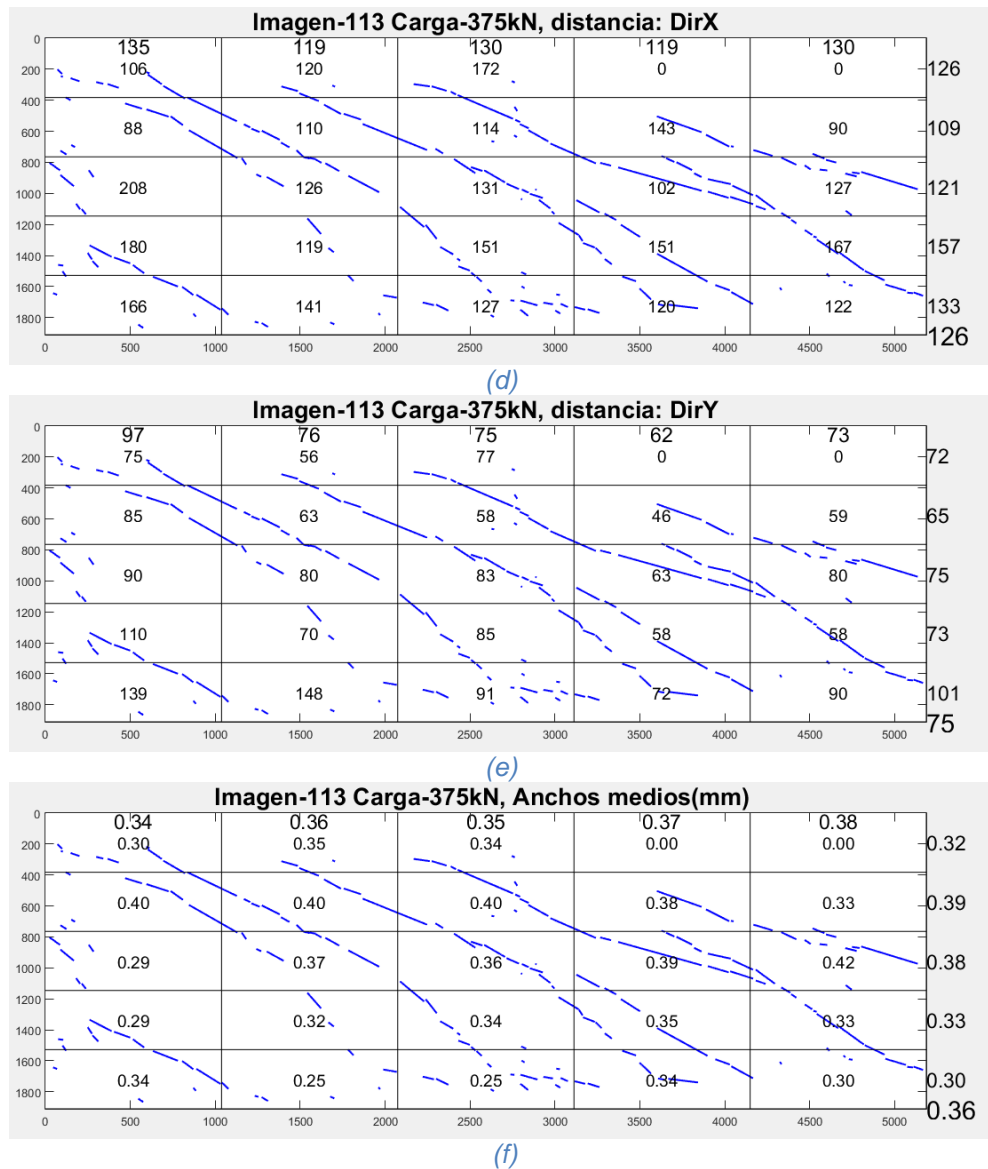
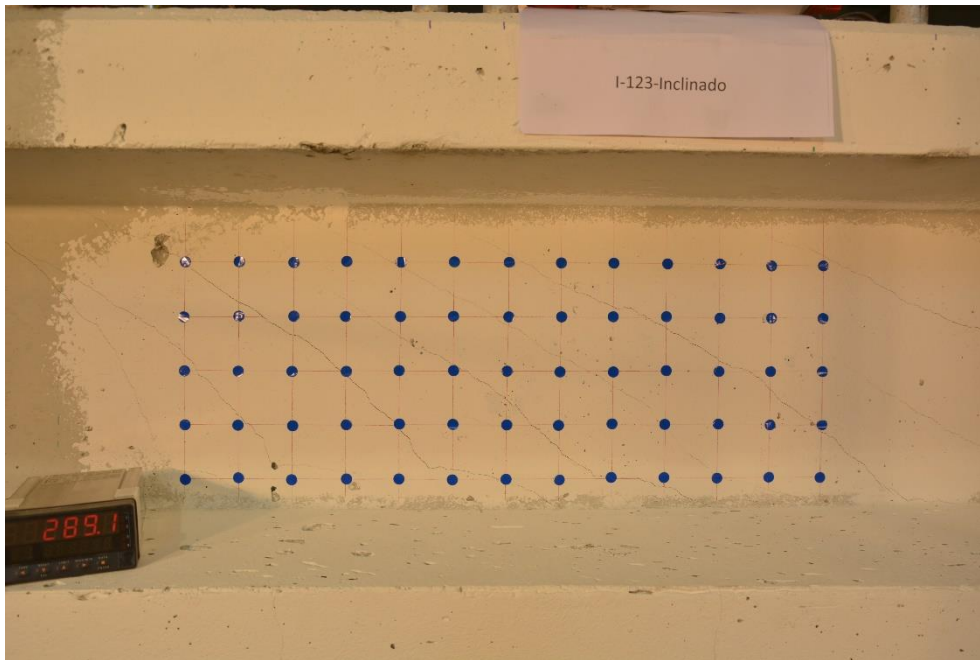
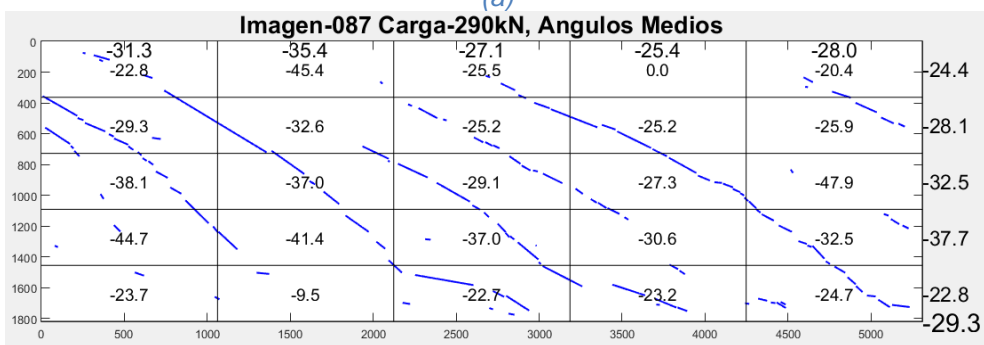


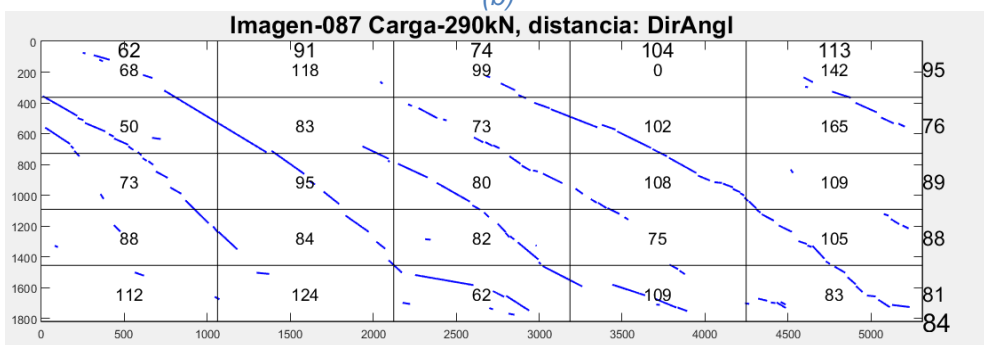
Figura 5-1. Patrón de Fisuras Viga I121I-Ciclo 3.



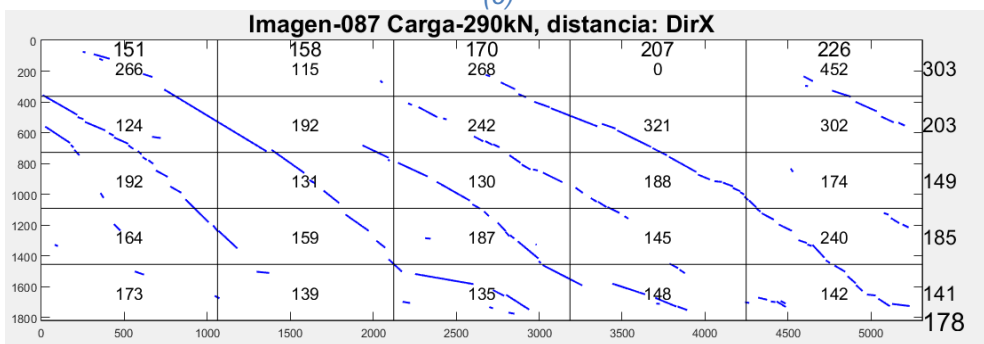
(a)



(b)



(c)



(d)

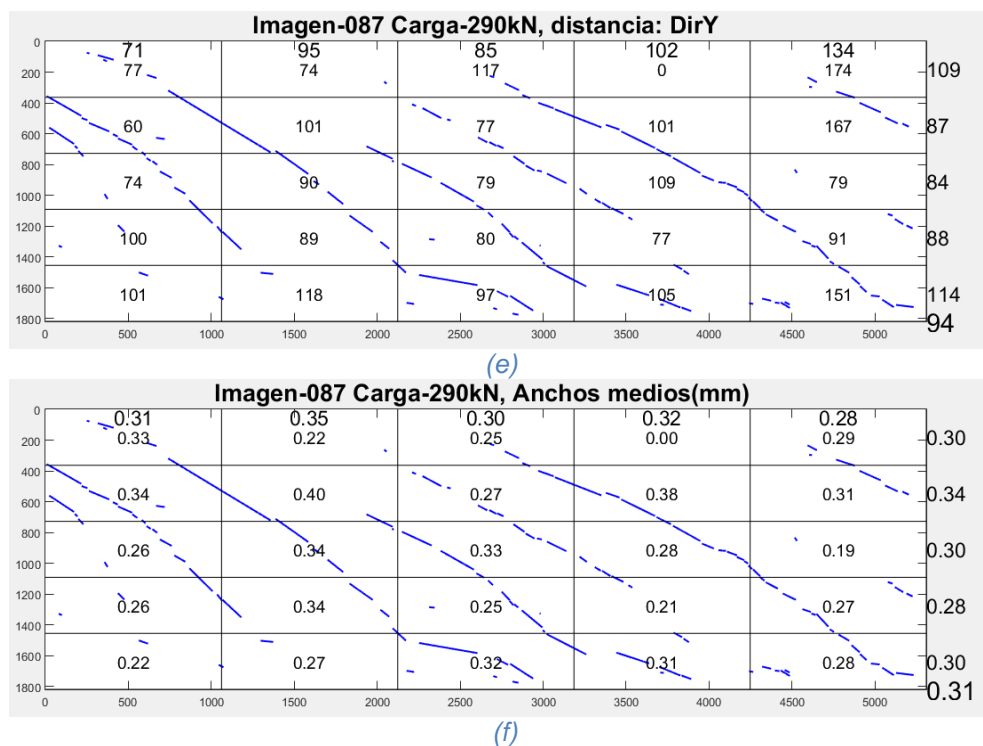
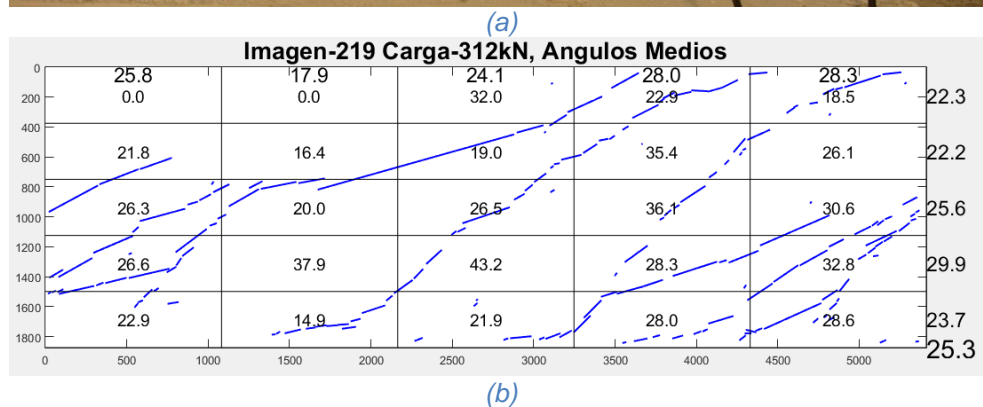
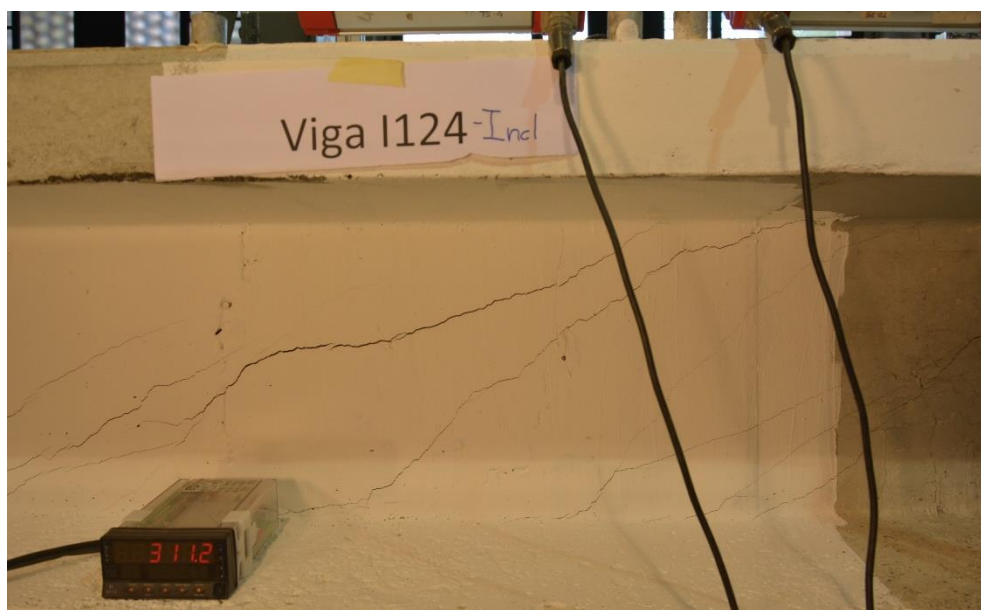


Figura 5-2. Patrón de Fisuras Viga I123I-Ciclo 3.



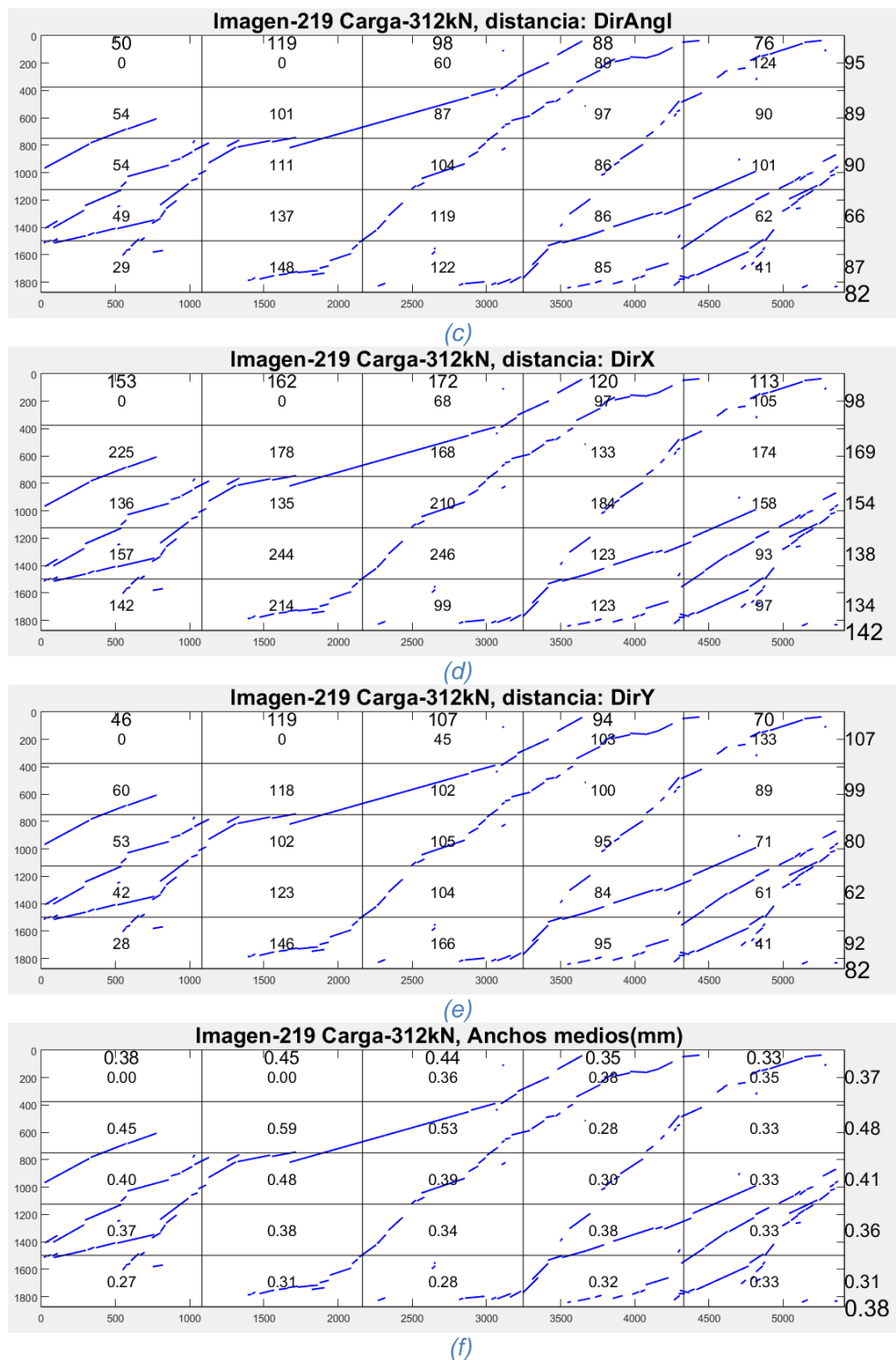
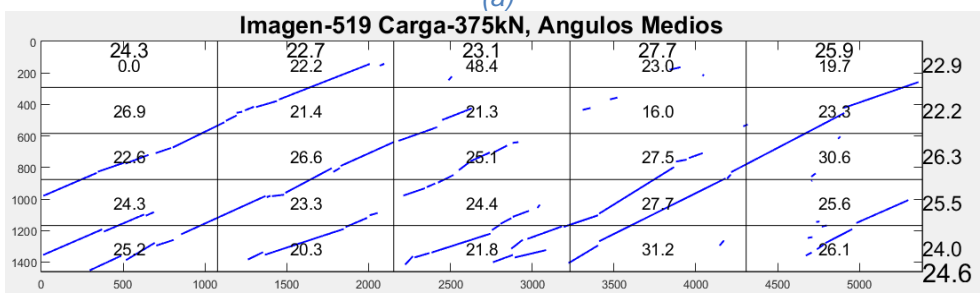


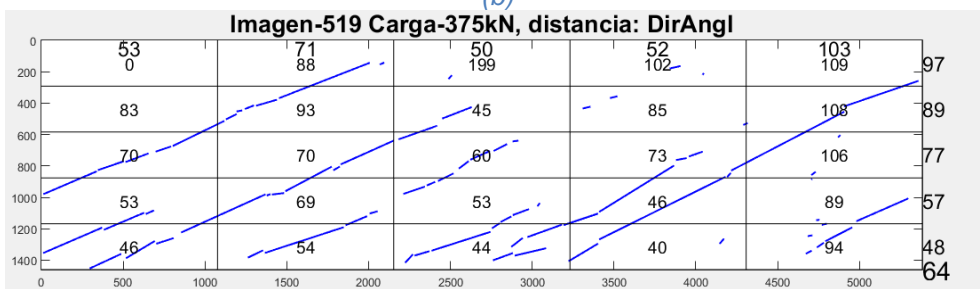
Figura 5-3. Patrón de Fisuras Viga I24I-Ciclo 3.



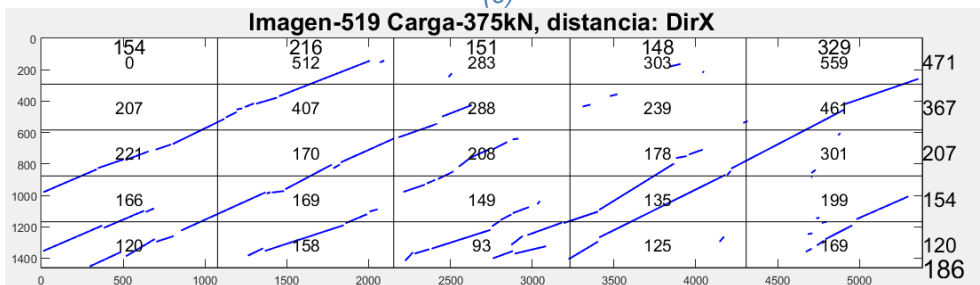
(a)



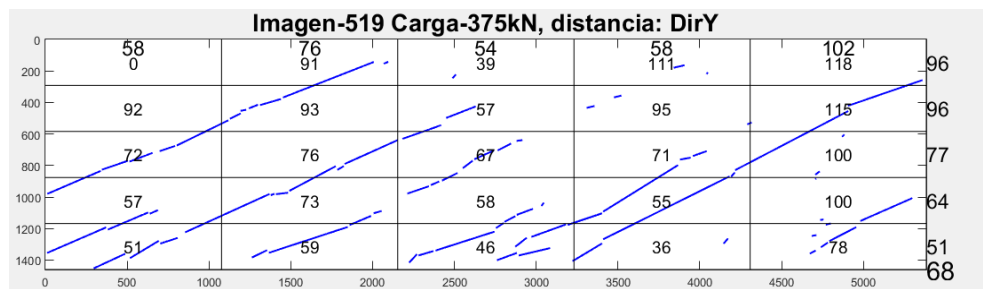
(b)



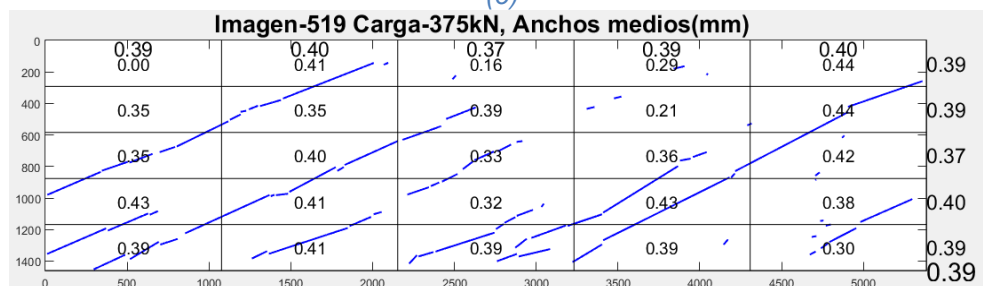
(c)



(d)



(e)

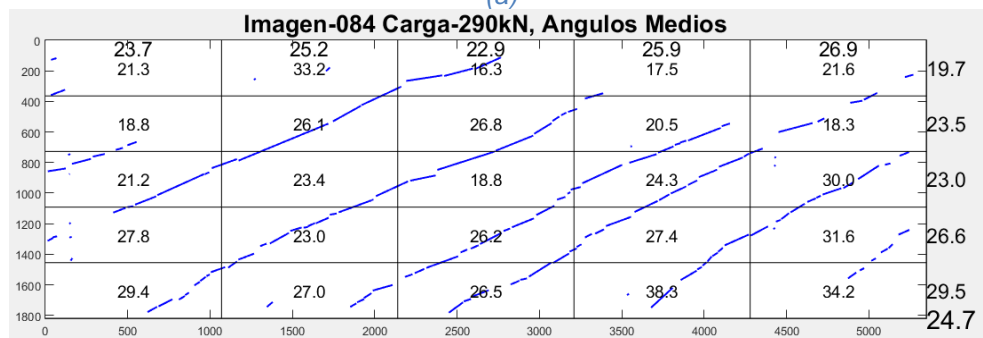


(f)

Figura 5-4. Patrón de Fisuras Viga I121R-Ciclo 3.



(a)



(b)

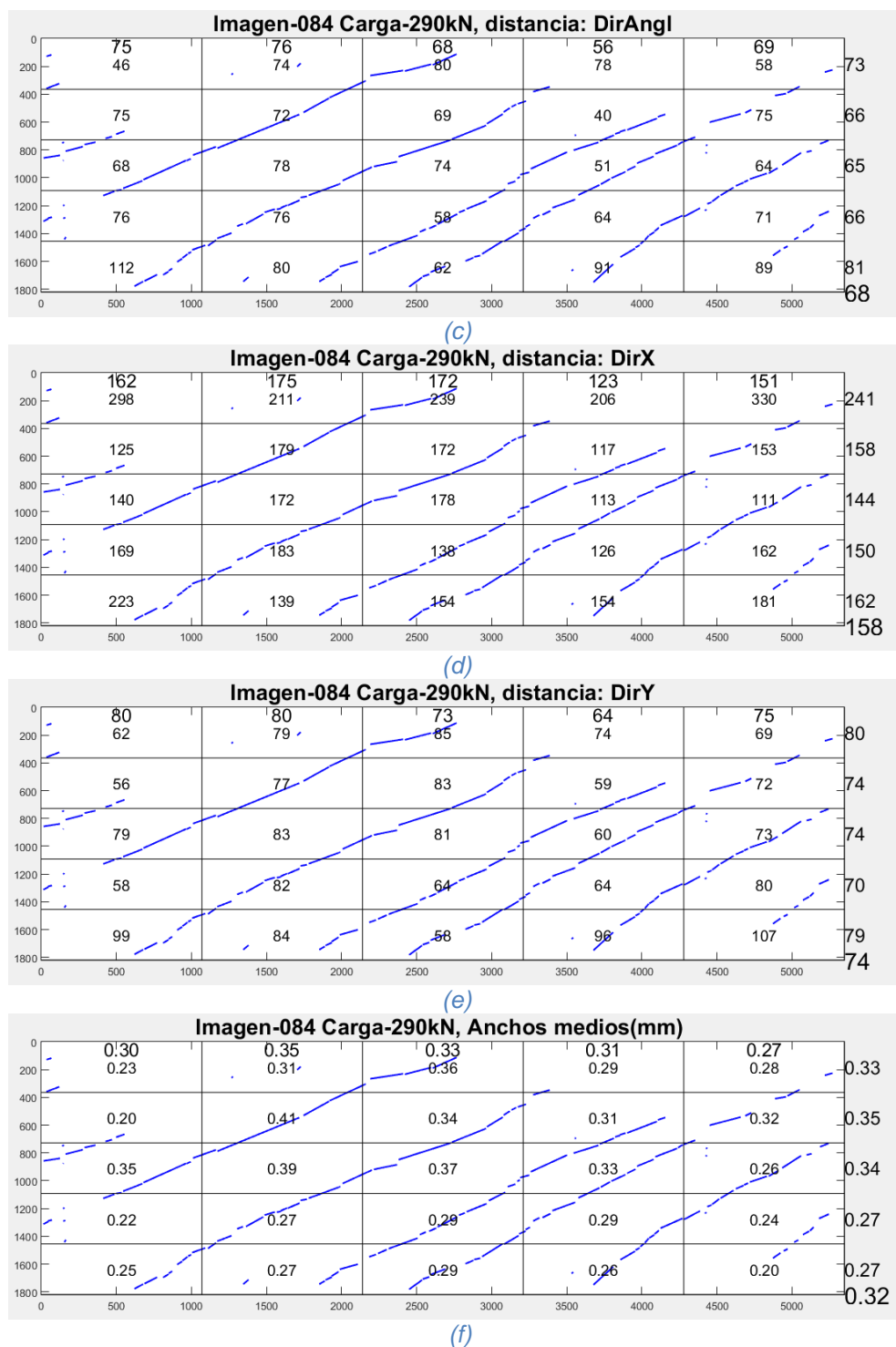
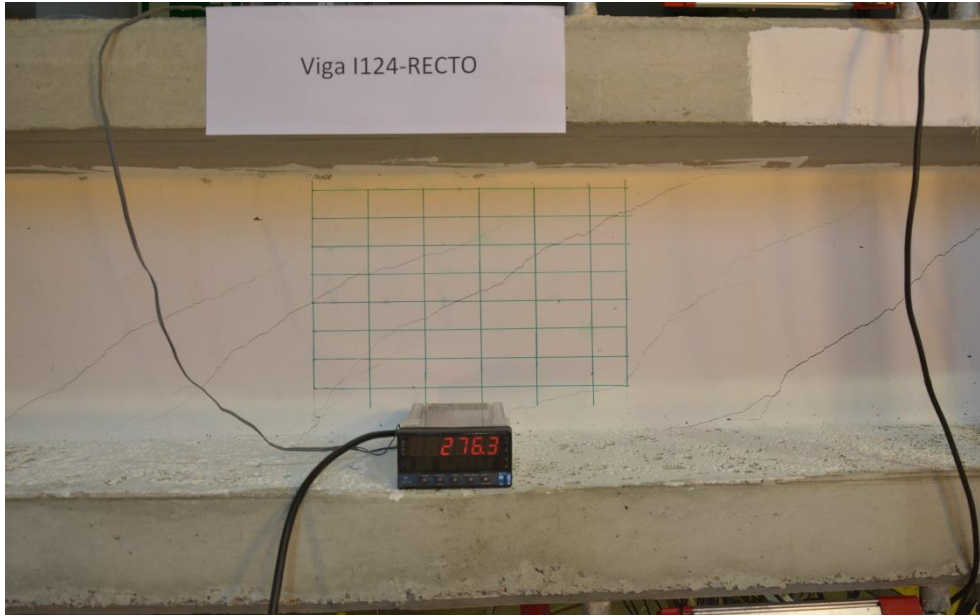
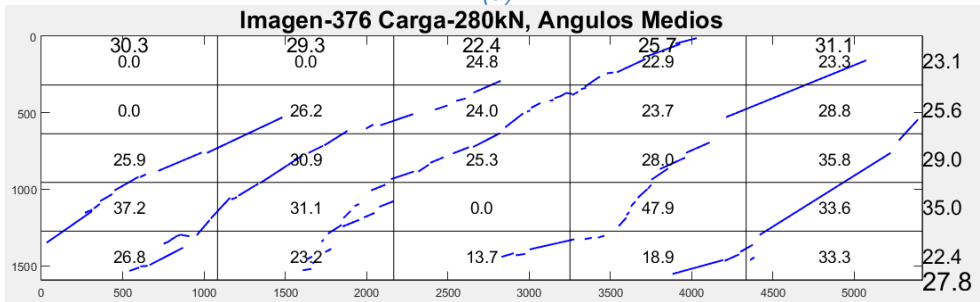


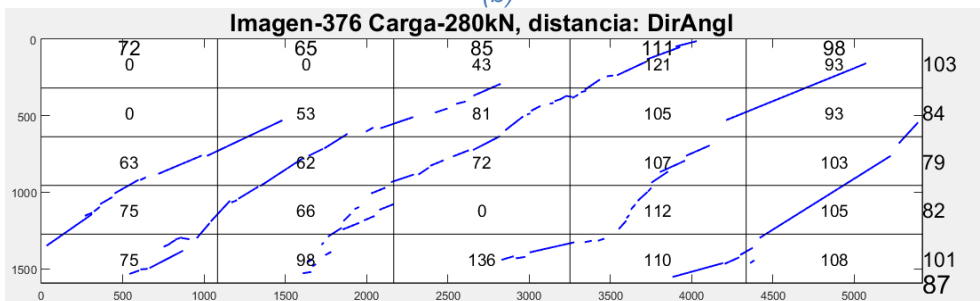
Figura 5-5. Patrón de Fisuras Viga I123R-Ciclo 3.



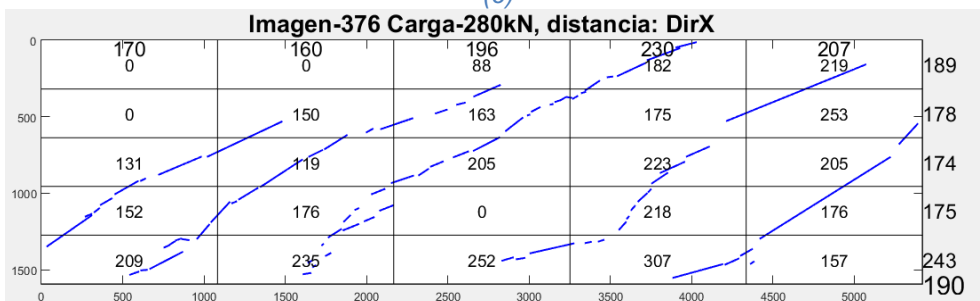
(a)



(b)



(c)



(d)

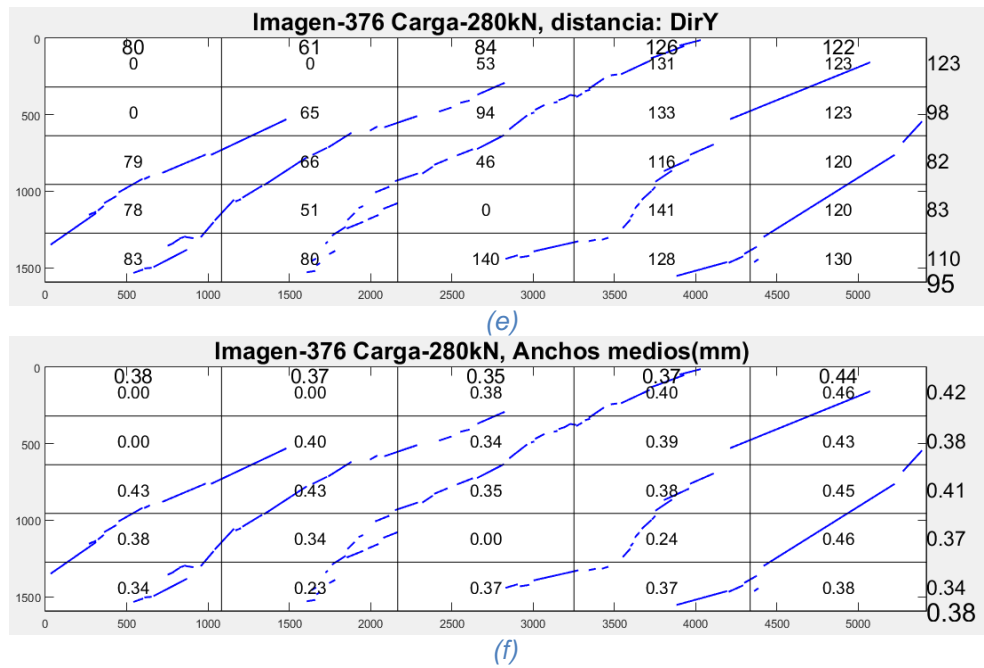
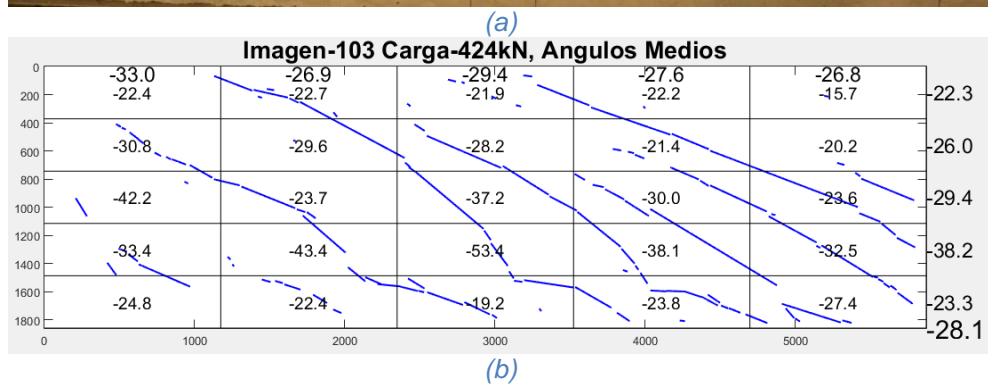
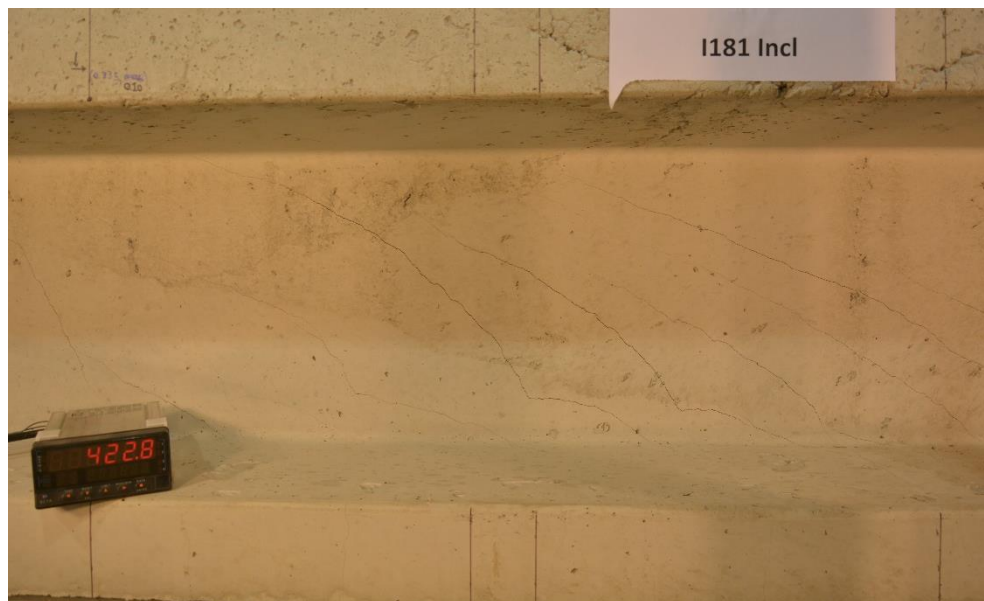


Figura 5-6. Patrón de Fisuras Viga I124R-Ciclo 3.



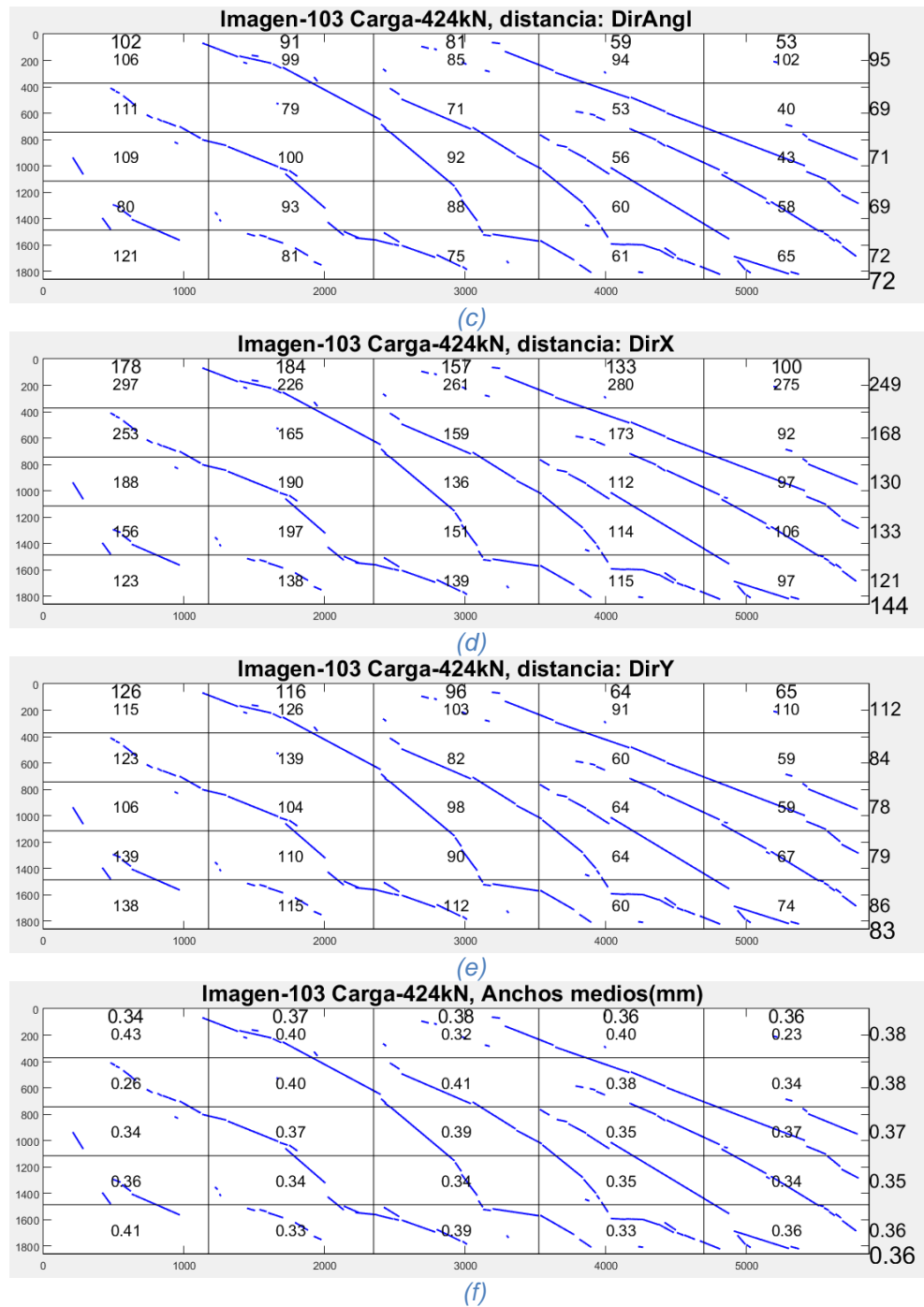
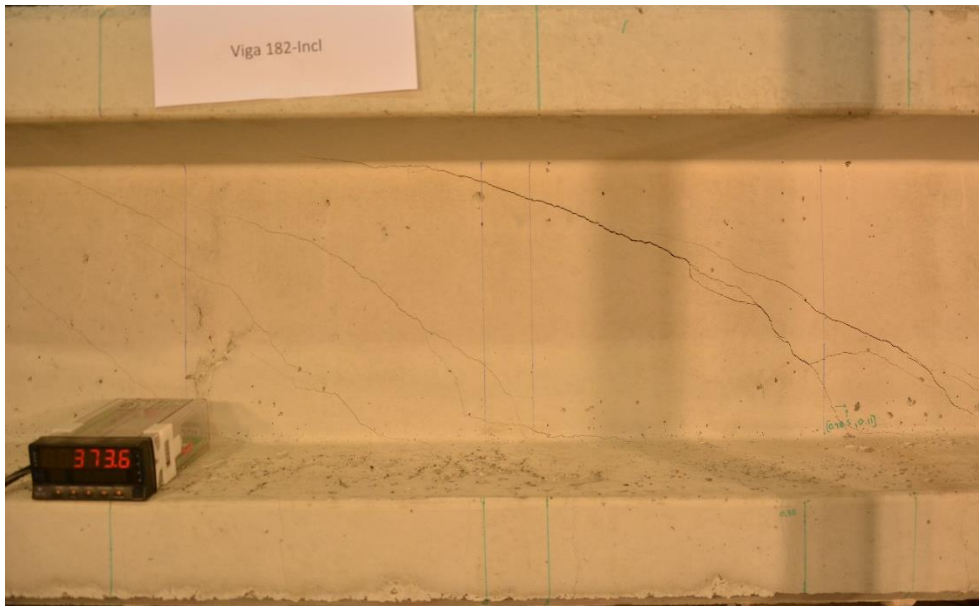
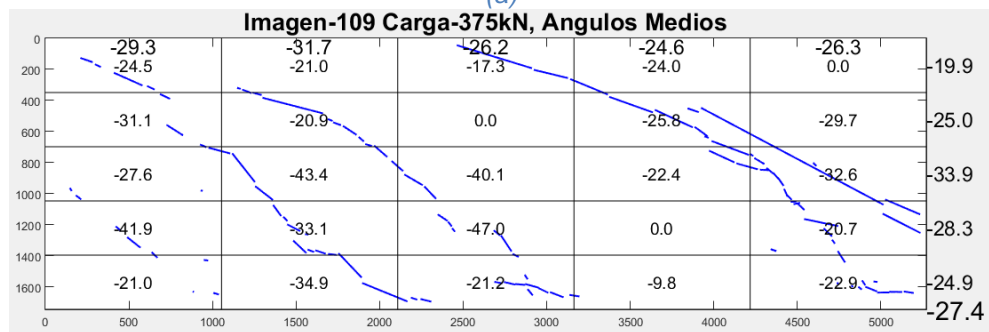


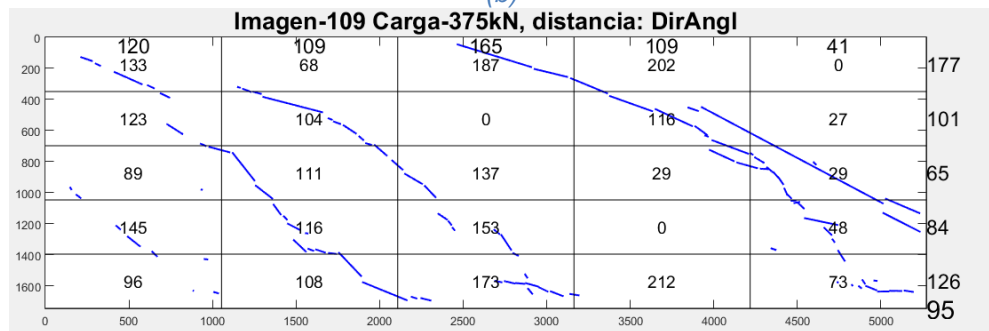
Figura 5-7. Patrón de Fisuras Viga I181I-Ciclo 3.



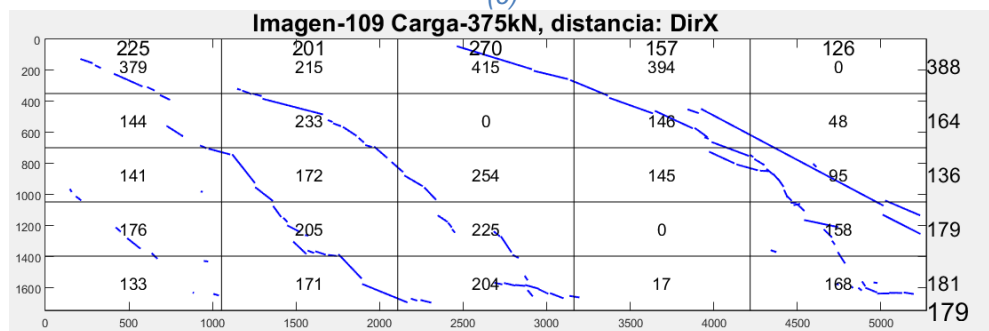
(a)



(b)



(c)



(d)

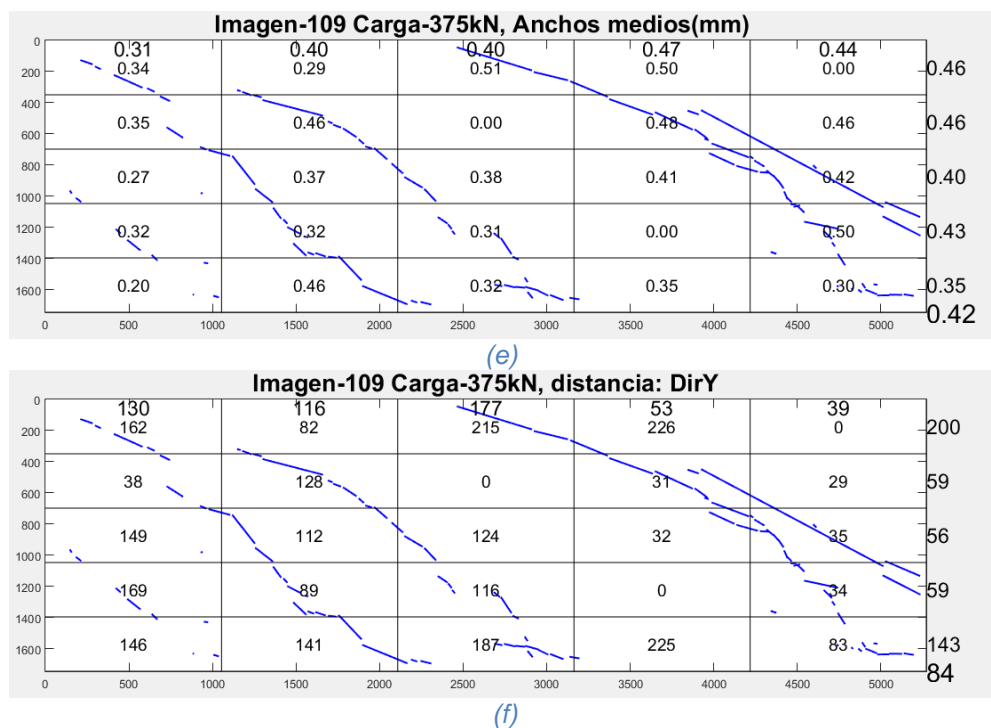
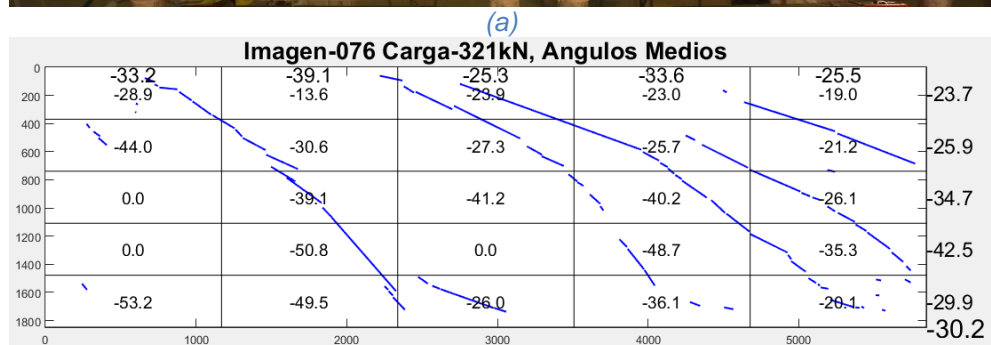


Figura 5-8. Patrón de Fisuras Viga I182I-Ciclo 3.



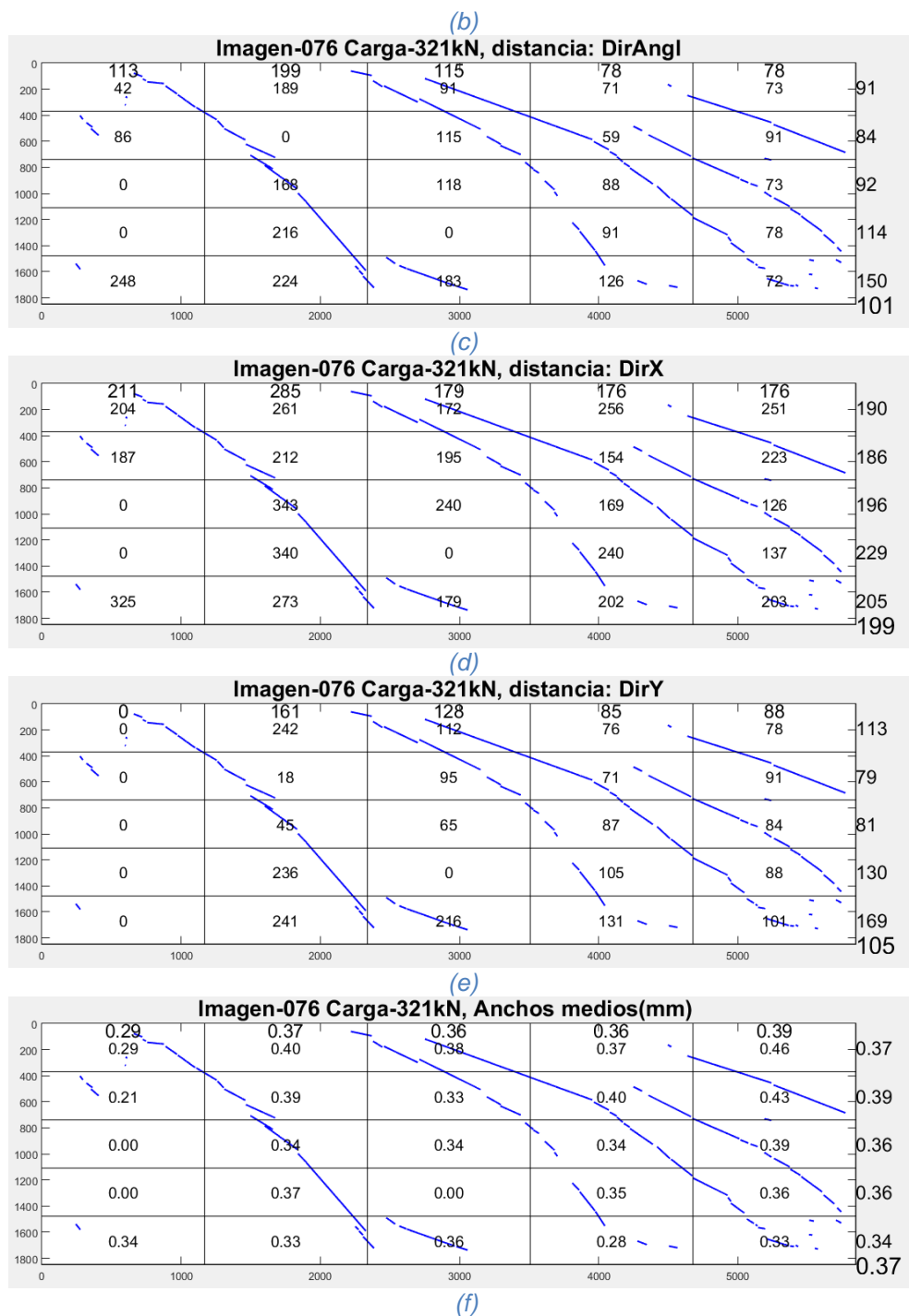
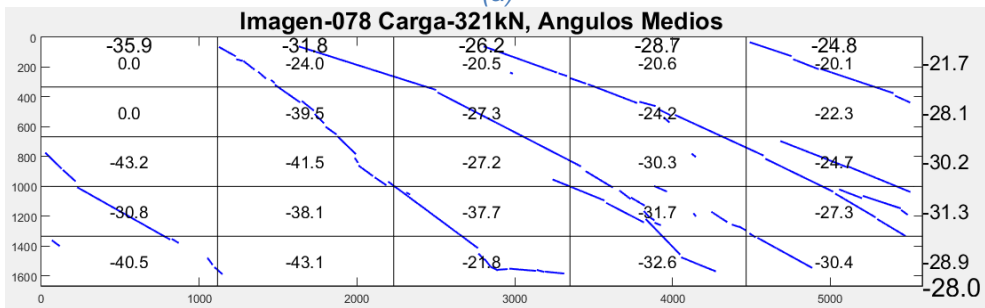


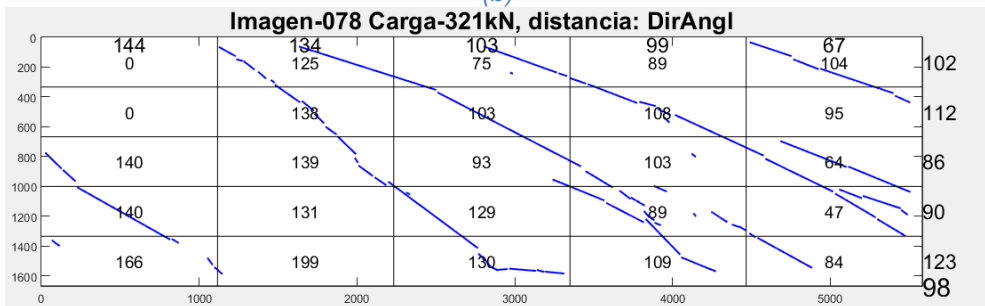
Figura 5-9. Patrón de Fisuras Viga I183I-Ciclo 3.



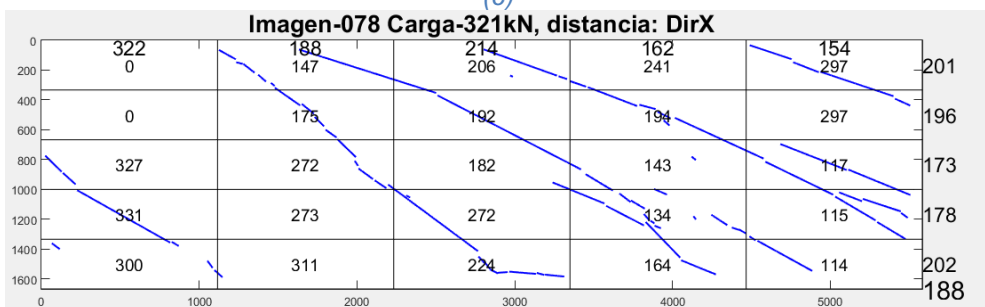
(a)



(b)



(c)



(d)

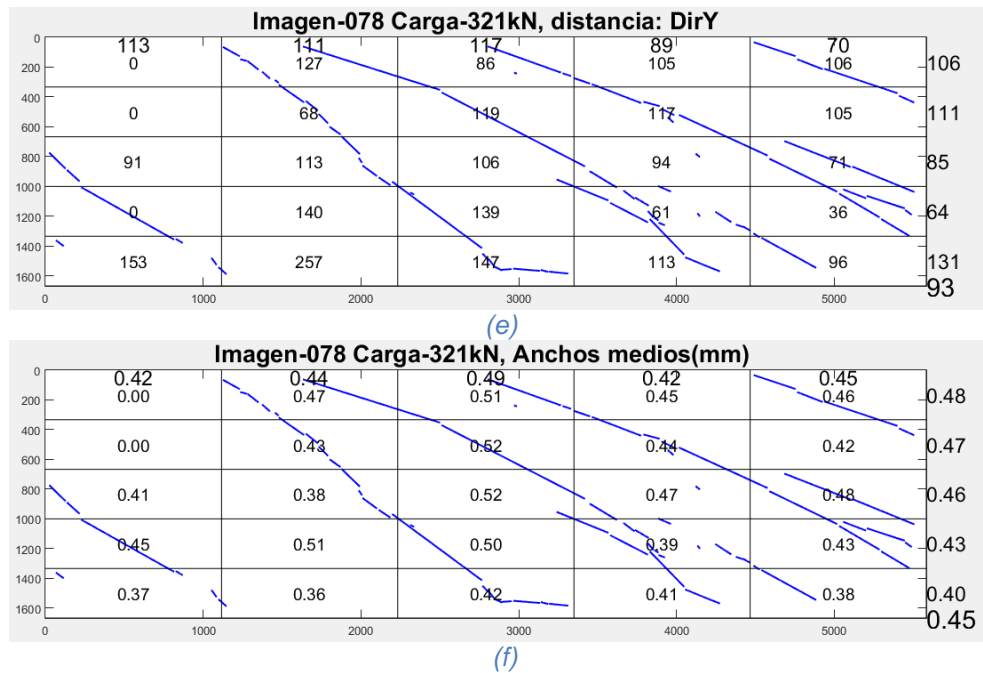


Figura 5-10. Patrón de Fisuras Viga I184I-Ciclo 3.



Figura 5-11. Trabajos de instrumentación de armaduras.



Figura 5-12. Hormigonado de vigas.